Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по молодежной политике и
развитию образования
_____А. В. Легостев
«14» ноября 2024 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ВОСПИТАНИЯ
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

для всех направлений подготовки и специальностей

СОГЛАСОВАНО
Председатель Объединенного совета
обучающихся ФГБОУ ВО «УГГУ»
(протокол № 25 от 15.11.2023)
_____ А. А. Кухарева

Председатель Первичной профсоюзной
организации ФГБОУ ВО «УГГУ»
(протокол № 5 от 24.10.2023)
_____ П. А.Коновалов

Председатель Совета родителей
ФГБОУ ВО «УГГУ»
(протокол № 3/1 от 04.10.2023
_____ В. А. Пивова

Составитель: начальник управления по внеучебной
и социальной работе Шехтман Д.А.

Екатеринбург

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Наименование программы

Рабочая программа воспитания ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» (далее – УГГУ, университет).

Рабочая программа воспитания ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» представляет собой ценностно-нормативную, методологическую, методическую и технологическую основы организации воспитательной деятельности.

Рабочая программа воспитания (далее – Программа) ориентирована на организацию воспитательной деятельности субъектов образовательного и воспитательного процессов.

Воспитательная работа в университете направлена на создание благоприятных условий для личностного и профессионального развития студенческой молодёжи, формирование профессиональных и общекультурных/универсальных компетенций, таких как гражданственность, трудолюбие, ответственность, организованность, самостоятельность, инициативность, дисциплинированность.

Разработчик и координатор программы

Управление по внеучебной и социальной работе.

Нормативно-правовые основания программы

- Конституция Российской Федерации;
- Федеральный закон от 29.12.2012 №273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации»;
- Федеральный закон от 05.02.2018 № 15-ФЗ «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации по вопросам добровольчества (волонтерства)»;
- Указ Президента Российской Федерации от 19.12. 2012 г. № 1666 «Стратегия государственной национальной политики Российской Федерации на период до 2025 года»;
- Указ Президента Российской Федерации от 24.12.2014 № 808 «Основы государственной культурной политики»;
- Указ Президента Российской Федерации от 09.05.2017 № 203 «Стратегия развития информационного общества в Российской Федерации на 2017-2030 годы»;
- Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2018 № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года»;
- Указ Президента Российской Федерации от 21.07.2020 № 474 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года»;
- Указ Президента Российской Федерации от 02.07.2021 № 400 «Стратегия национальной безопасности Российской Федерации»;
- Указ Президента Российской Федерации от 09.11.2022 № 809 «Об утверждении основ государственной политики по сохранению и укреплению традиционных российских духовно-нравственных ценностей;
- Постановление Правительства Российской Федерации от 26.12.2017 № 1642 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие образования»;
- Распоряжение Правительства Российской Федерации от 29.11.2014 № 2403-р «Основы государственной молодежной политики Российской Федерации на период до 2025 года»;
- Распоряжение Правительства Российской Федерации от 29.05.2015 № 996-р «Стратегия развития воспитания в Российской Федерации на период до 2025 года»;
- Распоряжение Правительства Российской Федерации от 27.12.2018 № 2950-р «Концепция развития добровольчества (волонтерства) в Российской Федерации до 2025 года»;
- Распоряжение Правительства Российской Федерации от 12.11.2020 № 2945-р «Об утверждении Плана мероприятий по реализации в 2021-2025 годах Стратегии развития воспитания в Российской Федерации на период до 2025 года»;
- Устав ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет».

Сроки реализации программы - период реализации образовательной программы.

Ожидаемые результаты:

- исполнение положений Федерального закона «Об образовании в Российской Федерации» по вопросам воспитания обучающихся;
- реализация приоритетных направлений государственной молодежной политики по созданию условий для успешной социализации и эффективной самореализации обучающихся;
- привлечение к воспитательной работе в университете заинтересованных субъектов университетского сообщества;
- формирование у обучающихся духовных, социальных и профессиональных ценностей;
- обогащение личностного и социального опыта обучающихся;
- совершенствование форм и методов воспитательной работы;
- повышение степени вовлеченности обучающихся в организацию и проведение мероприятий воспитательного характера;
- совершенствование системы контроля и оценки воспитательной работы;
- расширение взаимодействия субъектов воспитательной работы с органами государственной власти и местного самоуправления, международными, всероссийскими, межрегиональными, региональными общественными объединениями, ключевыми стейкхолдерами;
- развитие традиций корпоративной культуры университета;
- повышение эффективности и качества реализуемых мероприятий;
- выпуск конкурентоспособных специалистов, обладающих высоким уровнем социально-личностных и профессиональных компетенций.

РАЗДЕЛ 1. ЦЕЛЕВОЙ

Воспитательная деятельность в университете, реализующем программы высшего и среднего профессионального образования, является одной из основных частей образовательного процесса, планируется и осуществляется в соответствии с приоритетами государственной политики в сфере воспитания.

Участниками образовательных отношений в части воспитания в университете являются:

- ректор;
- проректор по молодежной политике и развитию образования;
- начальник управления по внеучебной и социальной работе;
- заместители начальника управления по внеучебной и социальной работе;
- специалисты по социальной работе с молодежью;
- деканы факультетов;
- заведующие кафедрами;
- педагогические работники;
- академические кураторы;
- педагоги-психологи;
- члены Объединенного совета обучающихся;
- представители Совета родителей.

1.1 Цель и задачи воспитания обучающихся

Цель воспитания обучающихся ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» - развитие личности, создание условий для самоопределения и социализации на основе социокультурных, духовно-нравственных ценностей и принятых в российском обществе правил и норм поведения в интересах человека, семьи, общества и государства,

формирование у обучающихся чувства патриотизма, гражданственности, уважения к памяти защитников Отечества и подвигам Героев Отечества, закону и правопорядку, человеку труда и старшему поколению, взаимного уважения, бережного отношения к культурному наследию и традициям многонационального народа Российской Федерации, природе и окружающей среде.

Задачи воспитания:

– усвоение обучающимися знаний о нормах, духовно-нравственных ценностях, которые выработало российское общество (социально значимых знаний);

– формирование и развитие осознанного позитивного отношения к ценностям, нормам и правилам поведения, принятым в российском обществе (их освоение, принятие), современного научного мировоззрения, мотивации к труду, непрерывному личностному и профессиональному росту;

– приобретение социокультурного опыта поведения, общения, межличностных и социальных отношений, в том числе в профессионально ориентированной деятельности;

– подготовка к самостоятельной профессиональной деятельности с учетом получаемой квалификации (социально-значимый опыт) во благо своей семьи, народа, Родины и государства;

– подготовка к созданию семьи и рождению детей.

1.2 Направления воспитания

Рабочая программа воспитания УГГУ реализуется в единстве учебной и воспитательной деятельности с учётом направлений воспитания:

гражданское воспитание — формирование российской идентичности, чувства принадлежности к своей Родине, ее историческому и культурному наследию, многонациональному народу России, уважения к правам и свободам гражданина России; формирование активной гражданской позиции, правовых знаний и правовой культуры;

патриотическое воспитание — формирование чувства глубокой

привязанности к своей малой родине, родному краю, России, своему народу и многонациональному народу России, его традициям; чувства гордости за достижения России и ее культуру, желания защищать интересы своей Родины и своего народа;

духовно-нравственное воспитание — формирование устойчивых ценностно-смысловых установок, обучающихся по отношению к духовно-нравственным ценностям российского общества, к культуре народов России, готовности к сохранению, преумножению и трансляции культурных традиций и ценностей многонационального российского государства;

эстетическое воспитание — формирование эстетической культуры, эстетического отношения к миру, приобщение к лучшим образцам отечественного и мирового искусства;

физическое воспитание, формирование культуры здорового

образа жизни и эмоционального благополучия — формирование осознанного отношения к здоровому и безопасному образу жизни, потребности физического самосовершенствования, неприятия вредных привычек;

профессионально-трудовое воспитание — формирование позитивного и добросовестного отношения к труду, культуры труда и трудовых отношений, трудолюбия, профессионально значимых качеств личности, умений и навыков; мотивации к творчеству и инновационной деятельности; осознанного отношения к непрерывному образованию как условию успешной профессиональной деятельности, к профессиональной деятельности как средству реализации собственных жизненных планов;

экологическое воспитание — формирование потребности экологически целесообразного поведения в природе, понимания влияния социально-экономических процессов на состояние окружающей среды, важности рационального природопользования; приобретение опыта эколого-направленной деятельности;

ценности научного познания — воспитание стремления к познанию себя и других людей, природы и общества, к получению знаний, качественного образования с учётом личностных интересов

и общественных потребностей.

1.3 Целевые ориентиры воспитания

1.3.1 Инвариантные целевые ориентиры

Согласно «Основам государственной политики по сохранению и укреплению духовно-нравственных ценностей» (Указ Президента Российской Федерации от 09.11.2022 № 809) ключевым инструментом государственной политики в области образования, необходимым для формирования гармонично развитой личности, является воспитание в духе уважения к традиционным ценностям, таким как патриотизм, гражданственность, служение Отечеству и ответственность за его судьбу, высокие нравственные идеалы, крепкая семья, созидательный труд, приоритет духовного над материальным, гуманизм, милосердие, справедливость, коллективизм, взаимопомощь и взаимоуважение, историческая память и преемственность поколений, единство народов России.

В соответствии с Федеральным законом от 29.12.2012 № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации» воспитательная деятельность направлена на формирование у обучающихся чувства патриотизма, гражданственности, уважения к памяти защитников Отечества и подвигам Героев Отечества, закону и правопорядку, человеку труда и старшему поколению, взаимного уважения, бережного отношения к культурному наследию и традициям многонационального народа Российской Федерации, природе и окружающей среде».

Эти законодательно закрепленные требования в части формирования у обучающихся системы нравственных ценностей отражены в инвариантных целевых ориентирах воспитания выпускников университета и соотносятся с общими/универсальными компетенциями, формирование которых является результатом освоения образовательных программ в соответствии с требованиями федеральных государственных образовательных стандартов.

Инвариантные целевые ориентиры воспитания выпускников университета

Гражданское воспитание
– Осознанно выражающий свою российскую гражданскую принадлежность (идентичность) в поликультурном, многонациональном и многоконфессиональном российском обществе, в мировом сообществе. – Сознающий своё единство с народом России как источником власти и субъектом тысячелетней российской государственности, с российским государством, ответственность за его развитие в настоящем и будущем на основе исторического просвещения, российского национального исторического сознания. – Проявляющий гражданско-патриотическую позицию, готовность к защите Родины, способный аргументированно отстаивать суверенитет и достоинство народа России и российского государства, сохранять и защищать историческую правду. – Ориентированный на активное гражданское участие в социально-политических процессах на основе уважения закона и правопорядка, прав и свобод сограждан. – Осознанно и деятельно выражающий неприятие любой дискриминации по социальным, национальным, расовым, религиозным признакам, проявлений экстремизма, терроризма, коррупции, антигосударственной деятельности. – Обладающий опытом гражданской социально значимой деятельности (в студенческом самоуправлении, добровольческом движении, предпринимательской деятельности, экологических, военно-патриотических и др. объединениях, акциях, программах.
Патриотическое воспитание
– Осознающий свою национальную, этническую принадлежность, демонстрирующий приверженность к родной культуре, любовь к своему народу.

– Сознающий причастность к многонациональному народу Российской Федерации, Отечеству, общероссийскую идентичность. – Проявляющий деятельное ценностное отношение к историческому и культурному наследию своего и других народов России, их традициям, праздникам. – Проявляющий уважение к соотечественникам, проживающим за рубежом, поддерживающий их права, защиту их интересов в сохранении общероссийской идентичности.
Духовно-нравственное воспитание
– Проявляющий приверженность традиционным духовно-нравственным ценностям, культуре народов России с учётом мировоззренческого, национального, конфессионального самоопределения. – Проявляющий уважение к жизни и достоинству каждого человека, свободе мировоззренческого выбора и самоопределения, к представителям различных этнических групп, традиционных религий народов России, их национальному достоинству и религиозным чувствам с учётом соблюдения конституционных прав и свобод всех граждан. – Понимающий и деятельно выражающий понимание ценности межнационального, межрелигиозного согласия, способный вести диалог с людьми разных национальностей и вероисповеданий, находить общие цели и сотрудничать для их достижения. – Ориентированный на создание устойчивой семьи на основе российских традиционных семейных ценностей, рождение и воспитание детей и принятие родительской ответственности. – Обладающий сформированными представлениями о ценности и значении в отечественной и мировой культуре языков и литературы народов России.
Эстетическое воспитание
– Выражающий понимание ценности отечественного и мирового искусства, российского и мирового художественного наследия. – Проявляющий восприимчивость к разным видам искусства, понимание эмоционального воздействия искусства, его влияния на душевное состояние и поведение людей, умеющий критически оценивать это влияние. – Проявляющий понимание художественной культуры как средства коммуникации и самовыражения в современном обществе, значение нравственных норм, ценностей, традиций в искусстве. – Ориентированный на осознанное творческое самовыражение, реализацию творческих способностей, на эстетическое обустройство собственного быта, профессиональной среды.
Физическое воспитание, формирование культуры здоровья и эмоционального благополучия
– Понимающий и выражающий в практической деятельности понимание ценности жизни, здоровья и безопасности, значение личных усилий в сохранении и укреплении своего здоровья и здоровья других людей. – Соблюдающий правила личной и общественной безопасности, в том числе безопасного поведения в информационной среде. – Выражающий на практике установку на здоровый образ жизни (здоровое питание, соблюдение гигиены, режим занятий и отдыха, регулярную физическую активность), стремление к физическому совершенствованию. – Проявляющий сознательное и обоснованное неприятие вредных привычек (курения, употребления алкоголя, наркотиков, любых форм зависимостей), деструктивного поведения в обществе и цифровой среде, понимание их вреда для физического и психического здоровья. – Демонстрирующий навыки рефлексии своего состояния (физического, эмоционального, психологического), понимания состояния других людей. – Демонстрирующий и развивающий свою физическую подготовку, необходимую для избранной профессиональной деятельности, способности адаптироваться к стрессовым ситуациям в общении, в изменяющихся условиях (профессиональных, социальных, информационных, природных), эффективно действовать в чрезвычайных ситуациях. – Использующий средства физической культуры для сохранения и укрепления здоровья в процессе профессиональной деятельности и поддержания необходимого уровня физической подготовленности.
Профессионально-трудовое воспитание

– Понимающий профессиональные идеалы и ценности, уважающий труд, результаты труда, трудовые достижения российского народа, трудовые и профессиональные достижения своих земляков, их вклад в развитие своего поселения, края, страны. – Участвующий в социально значимой трудовой и профессиональной деятельности разного вида в семье, образовательной организации, на базе производственной практики, в своей местности. – Выражающий осознанную готовность к непрерывному образованию и самообразованию в выбранной сфере профессиональной деятельности. – Понимающий специфику профессионально-трудовой деятельности, регулирования трудовых отношений, готовый учиться и трудиться в современном высокотехнологичном мире на благо государства и общества. – Ориентированный на осознанное освоение выбранной сферы профессиональной деятельности с учётом личных жизненных планов, потребностей своей семьи, государства и общества. – Обладающий сформированными представлениями о значении и ценности выбранной профессии, проявляющий уважение к своей профессии и своему профессиональному сообществу, поддерживающий позитивный образ и престиж своей профессии в обществе.
Экологическое воспитание
– Демонстрирующий в поведении сформированность экологической культуры на основе понимания влияния социально-экономических процессов на природу, в том числе на глобальном уровне, ответственность за действия в природной среде. – Выражающий деятельное неприятие действий, приносящих вред природе, содействующий сохранению и защите окружающей среды. – Применяющий знания из общеобразовательных и профессиональных дисциплин для разумного, бережливого производства и природопользования, ресурсосбережения в быту, в профессиональной среде, общественном пространстве. – Имеющий и развивающий опыт экологически направленной, природоохранной, ресурсосберегающей деятельности, в том числе в рамках выбранной специальности, способствующий его приобретению другими людьми.
Ценности научного познания
– Деятельно выражающий познавательные интересы в разных предметных областях с учётом своих интересов, способностей, достижений, выбранного направления профессионального образования и подготовки. – Обладающий представлением о современной научной картине мира, достижениях науки и техники, аргументированно выражающий понимание значения науки и технологий для развития российского общества и обеспечения его безопасности. – Демонстрирующий навыки критического мышления, определения достоверности научной информации, в том числе в сфере профессиональной деятельности. – Умеющий выбирать способы решения задач профессиональной деятельности применительно к различным контекстам. – Использующий современные средства поиска, анализа и интерпретации информации, информационные технологии для выполнения задач профессиональной деятельности. – Развивающий и применяющий навыки наблюдения, накопления и систематизации фактов, осмысления опыта в естественнонаучной и гуманитарной областях познания, исследовательской и профессиональной деятельности.

1.3.2 Вариативные целевые ориентиры

Вариативные целевые ориентиры воспитания обучающихся университета сформулированы с учётом этнокультурных и региональных особенностей и не противоречат инвариантным целевым ориентирам.

Вариативные целевые ориентиры воспитания

Гражданское воспитание
– Осознающий себя членом общества на региональном и локальном уровнях, имеющим представление о родном крае как субъекте Российской Федерации.

– Демонстрирующий понимание значимости выбранной профессии для развития страны, проявляющий уважение к своей профессии и профессиональному сообществу. – Знающий и соблюдающий нормы профессиональной этики работника, поддерживающий благоприятный образ профессии в обществе. – Разделяющий традиционные российские ценности, проявляющий активную гражданскую позицию, готовый к защите Родины. – Знающий государственные устои и символику России, родного края, города, района и муниципальных образований. – Проявляющий нетерпимость к коррупционному поведению, умеющий принимать решения и нести за них ответственность. – Обладающий культурой межнационального общения в студенческой среде и обществе в целом. – Проявляющий уважительное отношение к национальному достоинству людей, их чувствам, религиозным убеждениям.
Патриотическое воспитание
– Понимающий свою сопричастность к прошлому, настоящему и будущему родного края, своей Родины — России, Российского государства. – Понимающий значение гражданских символов (государственная символика России, своего региона), праздников, мест почитания героев и защитников Отечества, проявляющий к ним уважение. – Изучающий и владеющий знаниями по истории родного края и своей малой родины.
Духовно-нравственное воспитание
– Уважающий духовно-нравственную культуру своей семьи, своего народа, семейные ценности с учётом национальной, религиозной принадлежности. – Сознающий ценность каждой человеческой жизни, признающий индивидуальность и достоинство каждого человека. – Умеющий оценивать поступки с позиции их соответствия нравственным нормам, осознающий ответственность за свои поступки.
Эстетическое воспитание
– Проявляющий ценностное отношение к культуре и искусству, к культуре речи и культуре поведения, к красоте и гармонии. – Обладающий знаниями о культурном наследии родного края. – Способный воспринимать и чувствовать прекрасное в быту, природе, искусстве, творчестве людей, профессиональном мастерстве. – Проявляющий стремление к самовыражению в разных видах художественной деятельности, искусстве, профессиональной деятельности.
Физическое воспитание, формирование культуры здоровья и эмоционального благополучия
– Владеющий знаниями о физической культуре и спорте, их истории, современном развитии в родном крае. – Ведущий и пропагандирующий здоровый образ жизни. – Проявляющий интерес к самообучению умениям и навыкам физкультурно-оздоровительной и спортивно-оздоровительной деятельности. – Бережно относящийся к физическому здоровью, соблюдающий основные правила здорового и безопасного для себя и других людей образа жизни, в том числе в информационной среде. – Владеющий основными навыками личной и общественной гигиены, безопасного поведения в быту, природе, обществе. – Ориентированный на физическое развитие с учётом возможностей здоровья, занятия физкультурой и спортом
Профессионально-трудовое воспитание
– Проявляющий уважение к труду, людям труда, бережное отношение к результатам труда, ответственное потребление. – Проявляющий интерес к разным профессиям. – Участвующий в различных видах трудовой деятельности.

– Владеющий комплексом знаний, умений и навыков, качеств личности, обеспечивающих возможность профессионального роста. – Обладающий основами экономической культуры и финансовой грамотности.
Экологическое воспитание
– Понимающий ценность природы, зависимость жизни людей от природы, влияние людей на природу, окружающую среду. – Выражающий готовность в своей профессиональной деятельности придерживаться экологических норм. – Содействующий сохранению окружающей среды, ресурсосбережению, эффективно действующий в чрезвычайных ситуациях. – Демонстрирующий экологическую культуру. – Проявляющий интерес к экологической обстановке в родном крае, вносящий свой вклад в ее улучшение.
Ценности научного познания
– Ориентированный на ценности непрерывного образования, в том числе и на самообразование. – Проявляющий интерес к участию в поисковой и исследовательской деятельности, техническому творчеству.

РАЗДЕЛ 2. СОДЕРЖАТЕЛЬНЫЙ

2.1 Уклад университета

Уральский государственный горный университет был учрежден 3 (16) июля 1914 года законом, утвержденным российским Императором Николаем II, как Екатеринбургский горный институт, который стал первым высшим учебным заведением на Урале.

Собранием Узаконений и Распоряжений Правительства, издаваемым при Правительствующем Сенате, от 27 января 1917 г. № 28 горный институт в городе Екатеринбурге был переименован в Уральский горный институт Императора Николая II, который приказом Главного управления учебными заведениями Народного Комиссариата тяжелой промышленности СССР от 18 декабря 1934 г. № 26/644 переименован в Свердловский горный институт, которому постановлением Совета Министров СССР от 13 января 1947 г, № 52 присвоено имя В.В. Вахрушева.

Указом Президиума Верховного Совета СССР от 12 мая 1969 года Свердловский горный институт им. В.В. Вахрушева был переименован в Свердловский ордена Трудового Красного Знамени горный институт им. В.В. Вахрушева, который распоряжением Совета Министров РСФСР от 10 июля 1991 г. № 736-р и приказом Государственного Комитета СССР по народному образованию от 22 июля 1991 г. № 346 был переименован в Уральский ордена Трудового Красного Знамени горный институт имени В.В. Вахрушева, переименованный приказом Государственного Комитета Российской Федерации по высшему образованию от 28 октября 1993 г. № 298 в Уральскую государственную горно-геологическую академию.

11 февраля 2003 года Уральская государственная горно-геологическая академия была внесена в Единый государственный реестр юридических лиц как государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Уральская государственная горно-геологическая академия, которое приказом Федерального агентства по образованию от 5 октября 2004 г. № 156 было переименовано в государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский государственный горный университет».

Приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 23 мая 2011 г. № 1724 государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский государственный горный университет» переименовано в федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального

образования «Уральский государственный горный университет», которое приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 29 октября 2015 г. №1261 переименовано в федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет».

За 106 лет своей деятельности вуз подготовил для работы на горнодобывающих и геологоразведочных предприятиях, в научно-исследовательских и проектно-конструкторских институтах отрасли более 110 000 горных инженеров, талантом и трудом которых создавался Уральский горнопромышленный комплекс.

В 2024 году УГГУ - первый вуз Урала празднует 110 лет со дня учреждения.

Университет реализует программы высшего, среднего профессионального, дополнительного и послевузовского профессионального образования в области геологии, геофизики, горного дела, экологии, экономики, информатики, автоматизации, горного машиностроения, художественного проектирования и обработки материалов.

В университете представлены все уровни высшего образования: бакалавриат, специалитет, магистратура и аспирантура.

В университете обучаются около 10 000 студентов.

Отличительной особенностью университета являются сильные связи с производством. Вуз сотрудничает более чем с 300 предприятиями – партнерами со всей России, в их числе — крупнейшие компании горнодобывающей отрасли. Подписаны договоры о совместной работе в рамках подготовки кадров с крупнейшими отраслевыми предприятиями страны и региона: Русской медной компанией, Уральской горно-металлургической компанией, Уралмашзаводом, ЕВРАЗ-холдингом и др. Ведется системная подготовка специалистов для предприятий зарубежных стран: Китая, Гвинеи, Македонии, Узбекистана, Таджикистана, Туркменистана, Монголии, Казахстана и др.

Университет славится своим сильным профессорско-преподавательским составом. На 38 кафедрах работают более 350 педагогических работников, из них более 250 кандидатов наук, порядка 60 докторов наук.

Вековая история позволила университету создать не только мощные образовательные традиции, но и научные школы. Их коллективы регулярно участвуют в масштабных государственных программах. С 1976 г. в диссертационных советах вуза защищено свыше 750 диссертаций.

В университете выпускается два журнала, внесенных Высшей аттестационной комиссией в Перечень научных журналов, публикация в которых является обязательной для защиты диссертаций.

Студенты вуза регулярно побеждают на Всероссийских олимпиадах и инженерных соревнованиях. Горняки трижды становились триумфаторами Международного чемпионата по решению инженерных кейсов «Case-In». Свыше сорока студентов УГГУ каждый год удостаиваются стипендий Президента РФ, Правительства РФ и Губернатора Свердловской области. Одним из знаковых научных мероприятий УГГУ является Уральская горнопромышленная декада. Сотни специалистов из России и зарубежных стран ежегодно приезжают в Горный университет, чтобы обсудить актуальные вопросы отрасли и найти партнеров для решения производственных задач.

В университете есть свои корпоративные знаки отличия – это герб, гимн, флаг и форменная одежда, которые используются при проведении мероприятий в масштабах университета, городского, регионального и всероссийского уровней с целью формирования корпоративного сознания у обучающихся.

Наиболее значимыми традиционными мероприятиями, событиями, составляющими основу воспитательной системы, являются День знаний, День солидарности в борьбе с терроризмом, День первокурсника, День Героев Отечества, День матери, День студента, День защитников Отечества, конкурс красоты «Мисс и Мистер Горный университет» и многие другие.

2.2 Воспитательные модули: виды, формы, содержание воспитательной деятельности

Модуль «Образовательная деятельность»

Реализация воспитательного потенциала образовательной деятельности предусматривает:

– использование воспитательных возможностей содержания учебных дисциплин и профессиональных модулей для формирования у обучающихся позитивного отношения к российским традиционным духовно-нравственным и социокультурным ценностям, подбор соответствующего тематического содержания, текстов для чтения, задач для решения, проблемных ситуаций для обсуждений и т. п., отвечающих содержанию и задачам воспитания;

– привлечение внимания обучающихся к ценностному аспекту изучаемых на аудиторных занятиях объектов, явлений, событий и т. д., инициирование обсуждений, высказываний обучающимися своего мнения, выработки личностного отношения к изучаемым событиям, явлениям;

– использование учебных материалов (образовательного контента, художественных фильмов, литературных произведений и проч.), способствующих повышению статуса и престижа рабочих профессий, прославляющих трудовые достижения, повествующих о семейных трудовых династиях;

– инициирование и поддержка исследовательской деятельности при изучении учебных дисциплин и профессиональных модулей в форме индивидуальных и групповых проектов, исследовательских работ воспитательной направленности;

– реализация курсов, дополнительных факультативных занятий исторического просвещения, патриотической, гражданской, экологической, научно-познавательной, краеведческой, историко-культурной, туристско-краеведческой, спортивно-оздоровительной, художественно-эстетической, духовно-нравственной направленности, а также курсов, направленных на формирование готовности обучающихся к вступлению в брак и осознанному родительству;

– организация и проведение экскурсий (в музеи, картинные галереи, технопарки, на предприятия и др.), экспедиций, походов.

Модуль «Кураторство»

Реализация воспитательного потенциала кураторства как особого вида педагогической деятельности, направленной в первую очередь на решение задач воспитания и социализации обучающихся, предусматривает:

– организацию социально-значимых совместных проектов, отвечающих потребностям обучающихся, дающих возможности для их самореализации, установления и укрепления доверительных отношений внутри учебной группы и между группой и куратором;

– сплочение коллектива группы через игры и тренинги на командообразование, походы, экскурсии, празднования дней рождения, тематические вечера и т. п.;

– организацию и проведение регулярных родительских собраний, информирование родителей об академических успехах и проблемах обучающихся, их положении в студенческой группе, о жизни группы в целом; помощь родителям и иным членам семьи во взаимодействии с педагогическим коллективом и администрацией;

– работа со студентами, вступившими в ранние семейные отношения, проведение консультаций по вопросам этики и психологии семейной жизни, семейного права;

– планирование, подготовку и проведение праздников, фестивалей, конкурсов, соревнований и т. д. с обучающимися.

Модуль «Наставничество»

Реализация воспитательного потенциала наставничества как универсальной технологии передачи опыта и знаний предусматривает:

– разработку программы наставничества;

– содействие осознанному выбору оптимальной образовательной траектории, в том числе для обучающихся с особыми потребностями (детей с инвалидностью и ограниченными возможностями здоровья, одаренных, обучающихся, находящихся в трудной жизненной ситуации);

– оказание психологической и профессиональной поддержки наставляемому в реализации им индивидуального маршрута и в жизненном самоопределении;

– определение инструментов оценки эффективности мероприятий по адаптации и стажировке наставляемого;

– привлечение к наставнической деятельности признанных авторитетных специалистов, имеющих большой профессиональный и жизненный опыт (работников предприятий и организаций-партнеров).

Модуль «Основные воспитательные мероприятия»

Реализация воспитательного потенциала основных воспитательных мероприятий предусматривает:

– проведение общих для всей образовательной организации праздников, ежегодных творческих (театрализованных, музыкальных, литературных и т. п.) мероприятий, связанных с общероссийскими, региональными, местными праздниками, памятными датами;

– проведение торжественных мероприятий, связанных с завершением образования, переходом на следующий курс, а также совместных мероприятий с организациями-партнерами, направленных на знакомство и приобщение к корпоративной культуре предприятия, организации;

– разработку и реализацию обучающимися социальных, социально-профессиональных проектов, в том числе с участием социальных партнёров университета;

– организацию тематических мероприятий, нацеленных на формирование уважительного отношения к противоположному полу, понимания любви как основы таких отношений и готовности к вступлению в брак (День матери, День семьи, любви и верности и т. д.);

Модуль «Организация предметно-пространственной среды»

Реализация воспитательного потенциала предметно-пространственной среды предусматривает совместную деятельность педагогов, обучающихся, других участников образовательных отношений по её созданию, поддержанию, использованию в воспитании:

– организация в доступных для обучающихся и посетителей местах музейно-выставочного пространства, содержащего экспозиции об истории и развитии университета с использованием исторических символов государства, региона, местности в разные периоды, о значимых исторических, культурных, природных, производственных объектах России, региона, местности;

– размещение карт России, регионов, муниципальных образований (современных и исторических, точных и стилизованных, географических, природных, культурологических, художественно оформленных, в том числе материалами, подготовленными обучающимися) с изображениями значимых культурных объектов своей местности, региона, России; портретов выдающихся государственных деятелей России, деятелей культуры, науки, производства, искусства, военных деятелей, героев и защитников Отечества;

– размещение, обновление художественных изображений (символических, живописных, фотографических, интерактивных) объектов природного и культурного наследия региона, местности, предметов традиционной культуры и быта;

– организацию и поддержание в университете звукового пространства позитивной духовно-нравственной, гражданско-патриотической воспитательной направленности (звонки-мелодии, музыка, информационные сообщения), исполнение гимна Российской Федерации (в начале учебной недели);

– оформление и обновление «мест новостей», стендов в помещениях общего пользования (холл первого этажа, рекреации и др.), содержащих в доступной, привлекательной форме новостную информацию позитивного профессионального, гражданско-патриотического, духовно-нравственного содержания;

– размещение материалов, отражающих ценность труда как важнейшей нравственной категории, представляющих трудовые достижения в профессиональной области, прославляющих героев и ветеранов труда, выдающихся деятелей производственной сферы, имеющей отношение к УГГУ, предметов-символов профессиональной сферы, размещение информационных справочных материалов о предприятиях профессиональной сферы, имеющих отношение к профилю университета;

– размещение, поддержание, обновление на территории университета выставочных объектов, ассоциирующихся с профессиональными направлениями обучения;

– создание и обновление книжных выставок профессиональной литературы, пространства свободного книгообмена;

– оборудование, оформление, поддержание и использование спортивных и игровых пространств, площадок, зон активного и спокойного отдыха;

– совместная с обучающимися популяризация символики УГГУ (флаг, гимн, эмблема, логотип и т. п.), используемой как повседневно, так и в торжественных ситуациях;

– разработка и обновление материалов (стендов, плакатов, инсталляций и др.), акцентирующих внимание обучающихся на важных для воспитания правилах, традициях, укладе образовательной организации, актуальных вопросах профилактики и безопасности.

Модуль «Взаимодействие с родителями (законными представителями)»

Реализация воспитательного потенциала взаимодействия с родителями (законными представителями) обучающихся предусматривает:

– организацию взаимодействия между родителями обучающихся и преподавателями, администрацией в области воспитания и профессиональной реализации студентов;

– проведение родительских собраний по вопросам воспитания, взаимоотношений обучающихся и педагогов, условий обучения и воспитания;

– привлечение родителей к подготовке и проведению мероприятий воспитательной направленности.

Модуль «Самоуправление»

Реализация воспитательного потенциала самоуправления обучающихся в университете, реализующем образовательные программы высшего и среднего профессионального образования, предусматривает:

– организацию и деятельность в университете органов самоуправления обучающихся (совет обучающихся и др.);

– представление органами самоуправления интересов обучающихся в процессе управления образовательной организацией, защита законных интересов, прав обучающихся;

– участие представителей органов самоуправления обучающихся в разработке, обсуждении и реализации рабочей программы воспитания, в анализе воспитательной деятельности;

– привлечение к деятельности студенческого самоуправления выпускников, работающих по специальности, добившихся успехов в профессиональной деятельности и личной жизни.

Модуль «Профилактика и безопасность»

Реализация воспитательного потенциала профилактической деятельности в целях формирования и поддержки безопасной и комфортной среды предусматривает:

– организацию деятельности педагогического коллектива по созданию в университете безопасной среды как условия успешной воспитательной деятельности;

– вовлечение обучающихся в проекты, программы профилактической направленности, реализуемые в УГГУ и в социокультурном окружении (антинаркотические, антиалкогольные, против курения, вовлечения в деструктивные детские и молодёжные объединения, культы, субкультуры, группы в социальных сетях; по безопасности в цифровой среде, на транспорте, на воде, безопасности дорожного движения, противопожарной безопасности, антитеррористической и антиэкстремистской безопасности, гражданской обороне и т. д.);

– сбор информации и регулярный мониторинг семей обучающихся, находящихся в сложной жизненной ситуации, профилактическая работа с неблагополучными семьями;

– организация психолого-педагогической поддержки обучающихся групп риска;

– организацию работы по развитию у обучающихся навыков саморефлексии, самоконтроля, устойчивости к негативному воздействию, групповому давлению;

– поддержку инициатив обучающихся, педагогов в сфере укрепления безопасности жизнедеятельности.

Модуль «Социальное партнёрство и участие работодателей»

Реализация воспитательного потенциала социального партнёрства университетом, реализующем образовательные программы высшего и среднего профессионального образования, в том числе во взаимодействии с предприятиями рынка труда, предусматривает:

– участие представителей организаций-партнёров, предприятий (организаций) и работодателей, в том числе в соответствии с договорами о сотрудничестве, в проведении отдельных производственных практик и мероприятий в рамках рабочей программы воспитания и календарного плана воспитательной работы (дни открытых дверей, ярмарки вакансий, государственные, региональные праздники, торжественные мероприятия и т. п.);

– участие представителей организаций-партнёров в проведении мастер-классов, аудиторных и внеаудиторных занятий, мероприятий профессиональной направленности;

– проведение на базе организаций-партнёров отдельных аудиторных и внеаудиторных занятий, презентаций, лекций, акций воспитательной направленности;

– проведение открытых дискуссионных площадок (студенческих, педагогических, родительских, совместных), куда приглашаются представители организаций-партнёров, на которых обсуждаются актуальные проблемы, касающиеся профессиональной сферы и рынка труда, жизни университета, муниципального образования, региона, страны;

– реализация социальных проектов, разрабатываемых и реализуемых обучающимися и педагогами совместно с организациями-партнёрами (профессионально-трудовой, благотворительной, экологической, патриотической, духовно-нравственной и т. д. направленности), ориентированных на воспитание обучающихся, преобразование окружающего социума, позитивное воздействие на социальное окружение.

Модуль «Профессиональное развитие, адаптация и трудоустройство»

Реализация воспитательного потенциала работы по профессиональному развитию, адаптации и трудоустройству в университете предусматривает:

– участие в конкурсах, фестивалях, олимпиадах профессионального мастерства (в т. ч. международных), работе над профессиональными проектами различного уровня (регионального, всероссийского, международного) и др.;

– циклы мероприятий, направленных на подготовку обучающихся к осознанному планированию своей карьеры, профессионального будущего (посещения центра содействия профессиональному трудоустройству выпускников, профессиональных выставок, ярмарок вакансий, дней открытых дверей на предприятиях и др.);

– экскурсии (на предприятия, в организации), дающие углублённые представления о выбранной специальности и условиях работы;

– организацию мероприятий, посвященных истории организаций/предприятий-партнёров; встреч с представителями коллективов, с работниками-стажистами, представителями трудовых династий, авторитетными специалистами, героями и ветеранами труда, представителями профессиональных династий;

– использование обучающимися интернет-ресурсов, способствующих более глубокому изучению отраслевых технологий, способов и приёмов профессиональной деятельности, профессионального инструментария, актуального состояния профессиональной области; онлайн курсов по интересующим темам и направлениям профессионального образования;

– консультирование обучающихся по вопросам построения ими профессиональной карьеры и планов на будущую жизнь с учётом индивидуальных особенностей, интересов, потребностей;

– проведение тренингов, нацеленных на формирование рефлексивной культуры, совершенствование умений в области анализа и оценки результатов деятельности.

Дополнительные модули

Модуль «Воспитание здорового образа жизни»

Реализация воспитательного потенциала работы по созданию условий для сохранения, укрепления и развития духовного, эмоционального, интеллектуального, личностного и физического здоровья обучающихся предусматривает:

– воспитание здоровой личности, формирование способности ставить цели и строить жизненные планы;

– формирование у обучающихся ответственного отношения к своему здоровью и потребности в здоровом образе жизни, физическом самосовершенствовании, занятиях спортивно-оздоровительной деятельностью, развитие культуры безопасной жизнедеятельности, профилактику наркотической и алкогольной зависимости, табакокурения и других вредных привычек;

– формирование бережного, ответственного и компетентного отношения к физическому и психологическому здоровью – как собственному, так и других людей, развитие культуры здорового питания.

Модуль «Художественно-эстетическое воспитание»

Реализация воспитательного потенциала работы по формированию культурно-эстетических взглядов, нравственных принципов обучающихся, повышению общего уровня культуры, формированию способности воспринимать и понимать произведения искусства во взаимосвязи с окружающим миром предусматривает:

– воспитание эстетического отношения к миру, включая эстетику быта, научного и технического творчества, спорта, общественных отношений;

– формирование способности к общему развитию, реализации творческого потенциала в учебной, профессиональной деятельности, самовоспитания и универсальной духовно-нравственной компетенции – «становиться лучше»;

– формирование чувства любви к Родине на основе изучения культурного наследия многонационального народа России;

– формирование художественно-эстетического мировоззрения, основанного на диалоге культур.

Модуль «Экологическое воспитание»

Реализация воспитательного потенциала работы по формированию экологической культуры, содействию сохранению окружающей среды, ресурсосбережению, воспитанию и развитию у обучающихся любви к окружающей природе предусматривает:

– развитие у обучающихся экологической культуры, бережного отношения к родной земле, природным богатствам России и мира, понимание влияния социально-экономических процессов на состояние природной и социальной среды;

– воспитание чувства ответственности за состояние природных ресурсов, формирование умений и навыков разумного природопользования, нетерпимого отношения к действиям, приносящим вред экологии; приобретение опыта эколого-направленной деятельности.

Модуль «Волонтерское движение»

Реализация воспитательного потенциала работы по формированию готовности к добровольчеству (волонтёрству) предусматривает:

– развитие навыков волонтерской деятельности через участие в подготовке и проведении социально-значимых мероприятий;

– развитие мотивации к активному и ответственному участию в общественной жизни страны, региона, университета, государственному управлению через организацию добровольческой деятельности;

– развитие способностей к сопереживанию и формированию позитивного отношения к людям, в том числе к лицам с инвалидностью и ограниченными возможностями здоровья;

– развитие компетенций сотрудничества со сверстниками, детьми младшего возраста, взрослыми в образовательной, общественно полезной, учебно-исследовательской, проектной и других видах деятельности.

РАЗДЕЛ 3. ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ

3.1 Кадровое обеспечение

Реализация рабочей программы воспитания осуществляется квалифицированными специалистами университета, в частности Управления по внеучебной и социальной работе, которое несёт ответственность за организацию воспитательной работы в университете; Студенческого культурного центра, Студенческого спортивного клуба «Горная машина», Студенческого центра патриотического воспитания «Святогор», Волонтерского центра УГГУ, которые проводят с обучающимися мероприятия воспитательного характера; психолого-педагогической службы, кураторами, педагогом-психологом, преподавателями, функционал которых регламентируется требованиями профессиональных стандартов, должностными инструкциями и иными нормативными документами.

3.2 Нормативно-методическое обеспечение

Нормативно-методическое обеспечение воспитательной деятельности осуществляется следующим образом: воспитательная деятельность ведется в соответствии с нормативно-правовыми документами федеральных органов исполнительной власти в сфере образования, требованиями федеральных государственных образовательных стандартов, Уставом университета и локальными актами университета с учетом сложившегося опыта воспитательной деятельности, и имеющимися ресурсами в университете.

3.3 Требования к условиям работы с обучающимися с особыми образовательными потребностями

В воспитательной работе с категориями обучающихся, имеющих особые образовательные потребности: обучающиеся с инвалидностью, ограниченными возможностями здоровья, из социально уязвимых групп (воспитанники детских домов, обучающиеся из семей мигрантов, билингвы и др.), одарённые, с отклоняющимся поведением, создаются особые условия.

В системе организации воспитательной деятельности с категориями обучающихся, имеющих особые образовательные потребности, устанавливаются сотрудничество препо-

давателей, кураторов, педагогов-психологов, родителей (законных представителей) обучающихся с целью устранения нарушенных функций, развития функциональных систем обучающихся, коррекции поведения, формирования социально-значимых качеств.

При организации воспитательного пространства создаются благоприятные условия для развития социально значимых отношений обучающихся, и, прежде всего, ценностных отношений к семье, труду, своему отечеству, своей малой и большой Родине, природе, миру, знаниям, культуре, здоровью, окружающим людям, к самим.

Формирование доброжелательного отношения к обучающимся, имеющим особые образовательные потребности и их семьям со стороны всех участников образовательных отношений, а также индивидуальный подход позволяет получить им необходимые социальные навыки, знания и умения необходимые для дальнейшей профессиональной деятельности.

При организации воспитания обучающихся с особыми образовательными потребностями осуществляется ориентация на:

– налаживание эмоционально-положительного взаимодействия с окружающими для их успешной социальной адаптации и интеграции как в университете, так и в профессиональной деятельности;

– формирование доброжелательного отношения к обучающимся и их семьям со стороны всех участников образовательных отношений;

– построение воспитательной деятельности с учётом индивидуальных особенностей и возможностей каждого обучающегося;

– обеспечение психолого-педагогической поддержки семей обучающихся, содействие повышению уровня их педагогической, психологической, социальной компетентности;

– формирование личности обучающегося с особыми образовательными потребностями с использованием адекватных физическому и психическому состоянию методов воспитания;

– создание оптимальных условий совместного воспитания и обучения обучающихся с особыми образовательными потребностями и их сверстников, с использованием адекватных вспомогательных средств и педагогических приёмов, организацией совместных форм работы с педагогом-психологом и другими специалистами университета;

– личностно-ориентированный подход в организации всех видов деятельности обучающихся с особыми образовательными потребностями.

3.4 Система поощрения профессиональной успешности и проявлений активной жизненной позиции обучающихся

Поощрение профессиональной успешности и проявлений активной жизненной позиции обучающихся осуществляется следующим образом:

– выплачивается повышенная государственная академическая стипендия;

– предоставляются путевки на летний отдых и оздоровление;

– представляются кандидатуры обучающихся на стипендию Правительства Российской Федерации;

– представляются кандидатуры обучающихся на стипендию Губернатора Свердловской области;

– вручаются благодарственные письма, письма участников.

Основания для поощрения обучающихся:

– успехи в учебной деятельности;

– успехи научной деятельности;

– успехи в культурно-творческой деятельности;

– успехи в общественной деятельности;

– успехи в физкультурной деятельности;

– победы в конкурсах, олимпиадах, фестивалях, соревнованиях различного уровня;

– активное участие в культурно-массовых мероприятиях на уровне университета, округа, региона, Российской Федерации, на международном уровне;

– спортивные достижения на различных уровнях.

3.5 Анализ воспитательного процесса

Основные направления анализа воспитательного процесса:

3.5.1 Анализ условий воспитательной деятельности

Анализ воспитательной деятельности проводится по следующим позициям:

– кадровое обеспечение воспитательной деятельности (наличие специалистов, прохождение курсов повышения квалификации);

– наличие и количество студенческих объединений, клубов, предметных кружков, кружков технического творчества, спортивных секций и кружков;

– количество социальных партнеров, вовлечённых в воспитательную деятельность (предприятия, учреждения культуры, здравоохранения, правоохранительные органы, образовательные организации др.);

– участие педагогических работников университета в конкурсах, семинарах, конференциях, вебинарах по направлениям воспитательной деятельности;

– оформление предметно-пространственной среды университета.

3.5.2 Анализ состояния воспитательной деятельности

Анализ состояния воспитательной деятельности проводится по следующим позициям:

– проводимые в университете дела и реализованные проекты;

– уровень вовлеченности обучающихся в проекты и мероприятия на уровне университета, районном, городском, региональном и федеральном уровнях;

– включенность обучающихся и преподавателей в деятельность различных объединений;

– участие обучающихся в конкурсах различного уровня и направленности;

– профессионально-личностное развитие обучающихся (анализ портфолио);

– снижение негативных факторов (уменьшение числа обучающихся, состоящих на различных видах профилактического учета/контроля, снижение/отсутствие совершенных правонарушений и преступлений).

Основным способом получения информации являются: педагогическое наблюдение, анкетирование, тестирование, беседы с обучающимися и их родителями (законными представителями), педагогическими работниками, представителями студенческого совета.

Анализ проводится проректором по молодежной политике и развитию образования, начальником управления по внеучебной и социальной работе, педагогом-психологом, кураторами академических групп.

Итогом самоанализа является перечень выявленных проблем, над решением которых предстоит работать коллективу университета.

Приложение к рабочей программе воспитания

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по молодежной политике и развитию образования
_____А. В. Легостев

14.11.2024

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН ВОСПИТАТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ
на 2024-2025 учебный год

В ходе планирования воспитательной деятельности университет учитывает воспитательный потенциал участия обучающихся в мероприятиях, проектах, конкурсах, акциях, проводимых на уровне:

Российской Федерации, в том числе:

«
Р «Большая перемена» https://bolshayaperemena.online/;
о «Лидеры России» https://лидерыроссии.рф/;
с «Мы Вместе» (волонтерство) https://onf.ru;
с отраслевые конкурсы профессионального мастерства;
и движения «Ворлдскиллс Россия»;
я движения «Абилимпикс»;

субъектов Российской Федерации, а также **отраслевые профессионально значимые события и праздники.**

№	Модуль	Курсы, группы	Сроки	Ответственные
	1. Образовательная деятельность			
1	Дисциплина «Основы российской государственности	I,II,III	01.09.2024-31.05.2025	Зубов В. В.
	2. Кураторство			
1	Воспитательное мероприятие «Час куратора»	I	01.09.2024-31.05.2025	Шехтман Д. А.
	3. Наставничество			
1	Подготовка и проведение адаптационного мероприятия «Неделя первокурсника 2024»	I	30.08.2024 - 04.09.2024	Шехтман Д. А.
	4. Основные воспитательные мероприятия			
1	Презентация студенческих общественных, спортивных, научных, творческих объединений	I	30.08.2024-04.09.2024	Шехтман Д. А.
2	Профориентационные мероприятия для студентов I курса	I	12.08.2024-17.08.2024	Коновалов П. А.
3	Спортивно-массовое мероприятие «Неделя футбола» и межнациональный футбольный турнир к Дню народного единства	I-V	01.11.2024-05.11.2024	Сухомлин С. Д.
4	Культурно-массовое мероприятие «Новогодний ректорский прием»	I-V	23.12.2024	Нижников Е. В.
5	Празднование дня Российского студенчества, Молебен святой мученице Татьяне	I-V	25.01.2025	Бачинин И. В.
6	Организация игры «Патриот»	I-V	19.02.2025-23.02.2025	Комаров А. А.
7	Праздничный концерт «День защитника отечества»	I-V	22.02.2025	Нижников Е. В.
8	Праздничный концерт «Международный женский день»	I-V	07.03.2025	Нижников Е. В.

9	Участие в первомайской демонстрации	I-V	01.05.2025	Коновалов П. А.
10	Патриотическая акция «Бессмертный полк Горного»	I-V	08.05.2025	Комаров А. А.
11	Праздничные мероприятия, посвященные 80 годовщине Победы в ВОВ	I-V	09.05.2025	Нижников Е. В.
12	Легкоатлетическая эстафета «Горняк»	I-V	17.05.2025	Сидоров С. Г.
	5. Организация предметно-пространственной среды			
13	Оформление и обновление новостных стендов	I-V	01.09.2024-30.05.2025	Пономарева Т. В.
14	Популяризация символики образовательной организации	I-V	01.09.2024-10.11.2024	Пономарева Т. В.
15	Подготовка и обновление тематических экспозиций в библиотеке университета	I-V	01.09.2024-30.05.2025	Справцева Е. А.
16	Разработка и реализация коворкинг зон для студентов	I-V	01.09.2024-30.05.2025	Коновалов П. А.
17	Оформление зданий университета, холлов, с использованием государственной символики России	I-V	10.09.2024	Комаров А. А.
	6. Взаимодействие с родителями (законными представителями)			
18	Деятельность Службы примирения университета и работа с конфликтными ситуациями	I-V	01.09.2024 – 30.05.2025	Первушина А. А.
	7. Самоуправление			
19	Обучающие мероприятия для студенческого актива УГГУ	I-V	01.09.2024-20.11.2024	Шехтман Д. А.
20	Обучающие мероприятия для активистов организационно-массовой комиссии ПСО УГГУ	I-V	14.09.2024-16.09.2024	Коновалов П. А.
21	Отчетно – выборные конференции профбюро факультетов	I-V	10.10.2024-25.10.2024	Коновалов П. А.
22	Проведение мероприятия среди студенческой молодёжи, направленного на повышение уровня медиа грамотности "Медиадиктант"	I-V	18.10.2024	Пономарева Т. В.
23	Обучающее мероприятие «ПРОФшкола Горно-механического факультета»	I-V	08.11.2024-12.11.2024	Коновалов П. А.
24	Обучающие мероприятия для активистов ФГХ	I-V	08.11.2024-12.11.2024	Коновалов П. А.
25	Интеллектуальная игра для обучающихся УГГУ «Интуиция»	I-V	10.11.2024	Коновалов П. А.

26	Интеллектуальная игра для обучающихся УГГУ «Квиз-турнир»	I-V	16.12.2024	Коновалов П. А.
27	Новогодняя студенческая елка «Елка желаний»	I-V	24.12.2024	Коновалов П. А.
28	Традиционная новогодняя лотерея среди членов профсоюза	I-V	25.12.2024	Коновалов П. А.
29	Культурно-массовое мероприятие для обучающихся УГГУ «Турнир по киберспорту»	I-V	25.12.2024	Коновалов П. А.
30	Образовательный проект «MediaLife»	I-V	10.01.2025–28.03.2025	Сухомлин С. Д.
31	Интеллектуальная онлайн игра «Что? Где? Когда?», посвященная Всероссийскому дню студента	I-V	25.01.2025	Коновалов П. А.
32	Встреча ректора университета со студенческим активом	I-V	25.01.2025	Шехтман Д. А.
33	Традиционное исполнение студенческих желаний ректором УГГУ А.В. Душиным	I-V	25.01.2025	Шехтман Д. А.
34	Образовательный проект АССК.про	I-V	15.02.2025-01.04.2025	Сухомлин С. Д.
35	Образовательный проект «GM School» для студентов и активистов УГГУ	I-V	04.04.2025-08.04.2025	Сухомлин С. Д.
36	Очный этап образовательного проекта АССК.про	I-V	01.05.2025-30.05.2025	Сухомлин С. Д.
	8. Профилактика и безопасность			
37	Подготовка к социально-психологическому тестированию (сбор сведений, проверка технических возможностей)	I-V	01.08.2024-31.08.2024	Первушина А. А.
38	Размещение информационных материалов по вопросам антитеррористической защищённости	I-V	01.09.2024-25.12.2024	Волков С. А., Пономарева Т. В.
39	Профилактика деструктивных явлений в студенческой среде (подготовка и размещение публикаций на сайте ФГХ, в сообществе «Педагог-психолог УГГУ» и подготовка информационных листов-вкладышей)	I-V	01.09.2024-25.12.2024	Первушина А.А.
40	Подготовка к социально-психологическому тестированию	I-V	01.09.2024-30.09.2024	Первушина А .А.

	(подготовка списков, генерация паролей, информационная кампания)			
41	Размещение информационных материалов об антикоррупционных мероприятиях и нормативной базе в сфере противодействия коррупции	I-V	01.09.2024-25.12.2024	Волков С. А., Пономарева Т. В.
42	Патриотическая акция, посвященная Дню солидарности в борьбе с терроризмом	I-V	03.09.2024	Старостин А. Н. Суслонов П. Е
43	Проведение социально-психологического тестирования	I-V	01.10.2024-30.10.2024	Первушина А. А.
44	Основы безопасного общения и способы защиты от негативного влияния со стороны лиц и групп деструктивной и экстремистской направленности (беседа-тренинг с обучающимися)	I-V	01.10.2024-30.10.2024	Старостин А. Н. Суслонов П. Е
45	Подготовка документации по итогам социально-психологического тестирования	I-V	01.11.2024-30.11.2024	Первушина А. А.
46	Разговор на равных (Тема: профилактика межнациональных и межконфессиональных конфликтов)	I-V	12.11.2024	Старостин А. Н.
47	Организация процедуры получения результатов социально-психологического тестирования и подготовка плана работы с лицами «группы риска»	I-V	01.12.2024-30.12.2024	Первушина А. А.
48	Профилактика деструктивных явлений в период сессии: публикация «От сессии до сессии… Продолжение»	I-V	10.01.2025	Первушина А. А.
49	Профилактика деструктивных явлений в студенческой среде: публикации информационно-просветительского, профилактического характера на психологическую тематику: «Моя свобода и/или свобода другого?» (профилактика буллинга/кибербуллинга)	I-V	01.03.2025-31.03.2025	Первушина А. А.

50	Профилактика деструктивных явлений в студенческой среде: публикации информационно-просветительского, профилактического характера на психологическую тематику: «Кому выгодно кормить наше ЭГО?» (профилактика правонарушений и экстремистских проявлений)	I-V	01.04.2025-30.04.2025	Первушина А. А.
	9. Социальное партнёрство и участие работодателей			
51	Уральский горнопромышленный форум	I-V	01.10.2024-31.10.2024	Костюк П. А.
52	Экскурсионные мероприятия (Альфа-банк)	I-V	04.12.2024	Коновалов П. А.
53	VIII Международный инженерный чемпионат Case-in	I-V	01.03.2025-31.03.2025	Костюк П. А.
54	Экскурсионные мероприятия (Екатеринбургский метрополитен)	I-V	29.03.2025	Коновалов П. А., Коренькова М. А.
55	Всероссийский фестиваль по робототехнике	I-V	01.04.2025-30.04.2025	Кухарева А. А.
56	Ярмарка студентов	I-V	20.04.2025	Коренькова М. А.
57	Уральская горнопромышленная декада	I-V	01.05.2025-30.05.2025	Валиев Н. Г. Лебзин М. С.
	10. Профессиональное развитие, адаптация и трудоустройство			
58	Профориентационные презентации для абитуриентов	I-V	01.09.2024-25.12.2024	Кухарева А. А.
59	Экскурсии по УГГУ для абитуриентов	I-V	01.09.2024-25.12.2024	Кухарева А. А.
60	Культурно-массовое мероприятие «Межвузовский Since-Slame»	I-V	02.11.2024-03.11.2024	Шехтман Д. А.
61	День памяти погибших при исполнении служебных обязанностей сотрудников органов внутренних дел	I-V	08.11.2024	Мальцев Н. В.
62	Культурно-массовое мероприятие «Экскурсия в Уральский геологический музей»	I-V	17.11.2024	Иванова Н. С.
63	Отборочный этап студенческих проектов «Проектный конвейер»	I-V	19.11.2024	Шехтман Д. А.
64	Лекция от приглашенного спикера для обучающихся о развитии личностных качеств	I-V	24.11.2024	Коновалов П. А.
65	День юриста	I-V	03.12.2024	Мальцев Н. В.

66	Тематическая выставка «Пожарное и спасательное дело в России»	I-V	09.01.2025-31.01.2025	Справцева Е. А.
67	Конкурс профессионального мастерства «Студенческий лидер УГГУ»	I-V	25.03.2025	Коновалов П. А.
68	День открытых дверей УГГУ	I-V	26.03.2025	Гензель О. В.
69	Организация и проведение мероприятия «Встреча выпускников всех поколений и День геолога»	I-V	01.04.2025-30.04.2025	Нижников Е. В.
70	Тематическая выставка «Нефтегазовая отрасль – поле для инноваций»	I-V	01.04.2025-15.04.2025	Справцева Е. А.
71	Поход студентов геологов «Тур де ФГиГ»	I-V	04.05.2025	Коновалов П. А.
72	Организация и проведение мероприятия «Торжественное вручение дипломов выпускникам УГГУ»	I-V	01.07.2025-10.07.2025	Нижников Е. В.
	11. Воспитание здорового образа жизни			
73	Проект «Уральская студенческая баскетбольная лига»	I-V	01.09.2024-25.12.2024	Сухомлин С. Д.
74	Психологическое консультирование	I-V	01.09.2024-25.06.2025	Первушина А. А.
75	Спортивно-массовое мероприятие «Турнир по Пейнтболу среди обучающихся УГГУ»	I-V	20.09.2024-24.09.2024	Сухомлин С. Д.
76	Осенний турслет	I-V	24.09.2024-26.09.2024	Комаров А. А.
77	Чемпионат УГГУ по стрельбе «Меткий стрелок»	I-V	25.10.2024-31.10.2024	Комаров А. А.
78	Спортивно-массовое мероприятие «День Рождение ССК УГГУ «Горная Машина»	I-V	07.11.2024	Сухомлин С. Д.
79	Профилактическое мероприятие «Экспресс-тестирование на ВИЧ»	I-V	18.11.2024-19.11.2024	Медянникова Н. Г.
80	Спортивно-массовое мероприятие для обучающихся УГГУ «Неделя баскетбола»	I-V	13.12.2024-20.12.2024	Сухомлин С. Д.
81	Студенческий спортивный баттл	I-V	17.12.2024	Сухомлин С. Д
82	Фестиваль зимних видов спорта, посвященный Всемирному дню снега	I-V	15.01.2025-16.01.2025	Сухомлин С. Д.
83	Внутривузовский отборочный этап чемпионата АССК России по 5-и видам спорта	I-V	15.02.2025–01.03.2025	Сухомлин С. Д.

84	Спортивно-массовое мероприятие Турнир по страйкболу среди факультетов УГГУ, посвященный 23 февраля	I-V	21.02.2025	Коновалов П. А.
85	Спортивный турнир среди женских команд факультетов УГГУ, посвященный «Международному женскому дню»	I-V	04.03.2025	Коновалов П. А.
86	Проект «От Студзачета к знаку отличия ГТО»	I-V	14.03.2025-21.03.2025	Сухомлин С. Д.
87	Ежегодная спартакиада общежитий УГГУ по баскетболу	I-V	15.03.2025	Коновалов П. А.
88	Профилактическое мероприятие для обучающихся УГГУ «Экспресс-тестирование на ВИЧ»	I-V	16.03.2025	Медянникова Н. Г.
89	Ежегодная спартакиада общежитий УГГУ по настольному теннису	I-V	16.03.2025	Коновалов П. А.
90	Ежегодная спартакиада общежитий УГГУ по стрельбе из пневматического ружья	I-V	17.03.2025	Коновалов П. А.
91	Спортивное мероприятие туристического клуба «Скалы Петра Гронского»	I-V	19.03.2025	Комаров А. А.
92	Ежегодная спартакиада общежитий УГГУ по минифутболу	I-V	22.03.2025	Коновалов П. А.
93	Ежегодная спартакиада общежитий УГГУ по волейболу	I-V	23.03.2025	Коновалов П. А.
94	Ежегодная спартакиада общежитий УГГУ по шахматам	I-V	24.03.2025	Коновалов П. А.
95	Оценка уровня информированности и отношение к проблеме эпидемии ВИЧ-инфекции среди студентов	I-V	01.04.2025-30.04.2025	Медянникова Н. Г.
96	Поход туристического клуба «Авантюрин» - «Покорение скал»	I-V	02.04.2025-03.04.2025	Комаров А. А.
97	Мероприятие, приуроченное к Всемирному дню здоровья	I-V	07.04.2025	Коновалов П. А.
98	Профилактическая акция для обучающихся УГГУ «Что выберешь ты?»	I-V	14.04.2025	Коновалов П. А.
99	Фестиваль летних уличных видов спорта «Горный X-games»	I-V	06.06.2025	Сухомлин С. Д.
	12. Художественно-эстетическое воспитание			

100	Культурно-массовое мероприятие «День знаний»	I-V	01.09.2024	Нижников Е. В
101	Участие университетской команды КВН в центральной/официальной лиге МС КВН (полуфинал)	I-V	01.09.2024 30.10.2024	Нижников Е. В
102	Участие коллектива УГГУ «ГрандMajor» в Международном фестивале по «Мажореткам»	I-V	01.10.2024-30.10.2024	Нижников Е. В.
103	Культурно-массовое мероприятие для обучающихся УГГУ «Литературный вечер»	I-V	07.10.2024	Коновалов П. А.
104	Культурно-массовое мероприятие «День культуры африканских стран»	I-V	12.10.2024	Иванова Н. С.
105	Культурно-массовое мероприятие для обучающихся УГГУ – Флешмоб, посвященный Дню первокурсника	I-V	14.10.2024-21.10.2024	Коновалов П. А.
106	Культурно-массовое мероприятие Смотр Художественной Самодеятельности для обучающихся первого курса	I-V	20.10.2024	Коновалов П. А.
107	Культурно-массовое мероприятие «День первокурсника»	I-V	21.10.2024	Нижников Е. В.
108	Международная просветительская акция «Большой этнографический диктант»	I-V	01.11.2024-30.11.2024	Старостин А. Н., Суслонов П. Е.
109	Участие университетской команды КВН в центральной/официальной лиге МС КВН (финал)	I-V	01.11.2024-30.11.2024	Нижников Е. В.
110	Фестиваль команд КВН «Уральские горы юмора»	I-V	25.11.2024	Нижников Е. В.
111	Культурно-массовое мероприятие для обучающихся УГГУ «Зимний бал 2024»	I-V	23.12.2024	Коновалов П. А.
112	Культурно-массовое мероприятие «Новый Год для детей работников УГГУ»	I-V	23.12.2024	Шехтман Д. А.
113	Культурно-массовое мероприятие «Новый год для иностранных студентов УГГУ». Конкурс рассказов о национальных новогодних традициях	I-V	24.12.2024	Иванова Н. С.
114	Конкурс красоты «Мисс и Мистер УГГУ-2025»	I-V	24.03.2025	Нижников Е. В.
115	Культурно-массовое мероприятие для обучающихся	I-V	21.04.2025	Коновалов П. А.

	УГГУ «Смотр художественной самодеятельности»			
116	Отчетный концерт студенческого культурного центра	I-V	26.05.2025	Нижников Е. В.
	13. Экологическое воспитание			
117	Экологическая акция по сбору отработанных батареек и пластиковых крышечек	I-V	01.09.2024-30.09.2024	Ершова А. А.
118	Реализация проекта «Экодворы» с Всероссийским экологическим движением «Делай!»	I-V	01.09.2024-30.12.2024	Ершова А. А.
119	Проведение субботников, совместно с Всероссийским экологическим движением «Делай!»	I-V	20.09.2024-20.10.2024	Ершова А. А.
120	Посадки саженцев деревьев с Всероссийским экологическим движением «Делай!»	I-V	20.09.2024-20.11.2024	Ершова А. А.
121	Экологические занятия в школах г. Екатеринбург	I-V	01.01.2025-30.04.2025	Ершова А. А.
122	Выезд эковолонтеров университета ИЭФ-TRIP “Источники”	I-V	17.02.2025	Коновалов П. А.
123	Проведение субботников, совместно с Всероссийским экологическим движением «Делай!»	I-V	01.04.2025-30.04.2025	Ершова А. А.
124	Выезд эковолонтеров университета ИЭФ-TRIP «Челябинская область»	I-V	11.05.2025	Коновалов П. А.
	14. Волонтерское движение			
125	Ежегодная благотворительная акция «Полезная макулатура»	I-V	01.11.2024-01.12.2024	Коновалов П. А., Ершова А. А.
126	День добровольца (волонтера) в России	I-V	05.12.2024	Ершова А. А.
127	Акция, приуроченная к национальному дню донора в России	I-V	26.04.2025	Коновалов П. А.
128	Посещение волонтерами ветеранов ВОВ и тружеников тыла, приуроченное ко «Дню Победы»	I-V	02.05.2025-11.05.2025	Ершова А. А.

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебно-методическому комплексу С.А. Упоров

ПРОГРАММА ГОСУДАРСТВЕННОЙ ИТОГОВОЙ АТТЕСТАЦИИ

Специальность
21.05.03 ***Технология геологической разведки***

Специализация
Геофизические методы исследования скважин

Автор: Вандышева К. В., к.г.-м.н.

Одобрена на заседании кафедры

Геофизики
(название кафедры)

Зав.кафедрой _____
(подпись)

Талалай А. Г.
(Фамилия И.О.)

Протокол № 2 от 29.09.2023
(Дата)

Рассмотрена методической комиссией факультета

геологии и геофизики
(название факультета)

Председатель _____
(подпись)

Вандышева К. В.
(Фамилия И.О.)

Протокол № 2 от 13.10.2023
(Дата)

Екатеринбург
2023

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ
1 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ 3
1.1 Требования к выпускной квалификационной работе
1.2 Порядок выполнения выпускной квалификационной работы

2 КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ВЫПОЛНЕНИЯ И ЗАЩИТЫ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ 16

3 ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ 18
3.1 Тематика выпускных квалификационных работ
3.2 Теоретические вопросы государственной итоговой аттестации, оценивающие сформированность общекультурных компетенций
3.3 Теоретические вопросы государственной итоговой аттестации, оценивающие сформированность общепрофессиональных компетенций

ПРИЛОЖЕНИЯ 20

ВВЕДЕНИЕ

Программа государственной итоговой аттестации по основной профессиональной образовательной программе по специальности 21.05.03 Технология геологической разведки, специализация «Геофизические методы исследования скважин» составлена в соответствии с требованиями:

- Порядка проведения государственной итоговой аттестации по образовательным программам высшего образования – программам бакалавриата, программам специалитета и программам магистратуры, утвержденного приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 29.06.2015 № 636;

- Федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования - специалитет по специальности 21.05.03 Технология геологической разведки, утверждённый приказом Минобрнауки России от 12.08.2020 № 977;

- - локальных нормативных актов университета, регламентирующих порядок проведения государственной итоговой аттестации.

Программа государственной итоговой аттестации включает:

I. Требования к выпускным квалификационным работам и порядку их выполнения (методические рекомендации по выполнению выпускных квалификационных работ);

II. Критерии оценки защиты выпускных квалификационных работ;

III. Оценочные материалы.

IV. Приложения

I МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1.1 ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ

1.1.1 Общие положения

Государственная итоговая аттестация представляет собой процесс итоговой проверки и оценки компетенций выпускника, полученных в результате обучения. Государственная итоговая аттестация выпускника высшего учебного заведения является обязательной и осуществляется после освоения образовательной программы в полном объеме. Цель итоговой государственной аттестации выпускников – установление уровня готовности выпускника к выполнению профессиональных задач.

Государственная итоговая аттестации выпускников, завершивших освоение основной профессиональной образовательной программы по специальности 21.05.03 Технология геологической разведки, специализация «Геофизические методы поиска и разведки месторождений полезных ископаемых» осуществляется в форме подготовки к процедуре защиты и защиты выпускной квалификационной работы.

Трудоемкость государственной итоговой аттестации – 12 з.е.:

- подготовка к процедуре защиты выпускной квалификационной работы – 9 з.е.;
- процедура защиты выпускной квалификационной работы – 3 з.е.

Трудоемкость государственной итоговой аттестации				
кол-во з.е.	часы			
	общая	контактная работа	СР	
9	432	35	397	Подготовка к процедуре защиты выпускной квалификационной работы
3	108		108	Процедура защиты ВКР

1.1.2 Цели и задачи выпускной квалификационной работы

Цель выполнения выпускной квалификационной работы (далее – ВКР):

систематизация, закрепление и расширение теоретических и практических знаний по направлению специальности и применение этих знаний при решении конкретных профессиональных задач;

развитие навыков ведения самостоятельной работы и применения методик исследования и экспериментирования при решении разрабатываемых в выпускной квалификационной работе проблем и вопросов;

выяснение подготовленности обучающихся для самостоятельной работы по задачам профессиональной деятельности, определенных федеральным государственным образовательным стандартом (далее - ФГОС) специальности.

Выпускная квалификационная работа выполняется, как правило, на материалах организаций (баз практики) с учетом проблем, требующих решения в данной организации.

Основными задачами, которые должен решить обучающийся при выполнении выпускной квалификационной работы являются:

обоснование актуальности и значимости выбранной темы работы с точки зрения теории и практики управления деятельностью предприятия, составление программы исследования;

изучение теоретических положений по проблеме, составление литературного обзора по проблеме исследования;

обоснование необходимости и возможности применения определенных современных методик принятия управленческих решений по задачам, поставленным в работе;

сбор необходимой для проведения исследования информации с привлечением первичных и вторичных источников и использованием адекватных методов;

разработка практических рекомендаций и предложений, их экономическое и организационное обоснование, необходимое и достаточное для решаемой задачи;

обобщение результатов проведенных исследований, формулирование выводов о степени достижения целей, поставленных в работе, и возможности практического применения предложенных разработок;

оформление ВКР в соответствии с нормативными требованиями.

В ходе государственной итоговой аттестации проверяется сформированность следующих компетенций:

Универсальных

Код и наименование компетенции	*Код и наименование индикатора достижения компетенции*
УК-1. Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.1.Выбирает информационные ресурсы для поиска информации в соответствии с поставленной задачей УК-1.2.Оценивает соответствие выбранного информационного ресурса критериям полноты и аутентичности УК-1.3.Систематизирует обнаруженную информацию, полученную из разных источников, в соответствии с требованиями и условиями задачи УК-1.4.Использует системный подход для решения поставленных задач.
УК-2. Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла	УК-2.1 Разрабатывает план осуществления проекта на всех этапах его жизненного цикла с учетом потребностей в необходимых ресурсах, имеющихся ограничений, возможных рисков; УК-2.2 Осуществляет мониторинг реализации проекта на основе структуризации всех процессов и определения зон ответственности его участников. УК-2.3 Публично представляет результаты проекта, вступает в обсуждение хода и результатов проекта.
УК-3. Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели	УК-3.1 Взаимодействует с другими членами команды для достижения поставленной задачи. УК-3.2 Вырабатывает стратегию командной работы и на ее основе организует отбор членов команды для достижения поставленной цели. УК-3.3 Организует и корректирует работу команды в том числе на основе коллегиальных решений.

УК-4. Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке(ах), для академического и профессионального взаимодействия	УК-4.1. Ведет обмен деловой информацией в устной и письменной формах на государственном языке. УК-4.2. Ведет обмен деловой информацией в устной и письменной формах не менее чем на одном иностранном языке. УК-4.3. Использует современные информационно-коммуникативные средства для коммуникации.
УК-5. Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия	УК-5.1. Толерантно воспринимает социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия УК-5.2. Анализирует современное состояние общества на основе знания истории. УК-5.3. Интерпретирует проблемы современности с позиций этики и философских знаний.
УК-6. Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки и образования в течение всей жизни	УК-6.1. Эффективно планирует собственное время. УК-6.2. Планирует траекторию своего профессионального развития и предпринимает шаги по ее реализации УК-6.3. Адекватно определяет свою самооценку, осуществляет самопрезентацию, составляет резюме
УК-7. Способен поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности	УК-7.1. Использует основы физической культуры для осознанного выбора здоровьесберегающих технологий с учетом внутренних и внешних условий реализации конкретной профессиональной деятельности. УК-7.2. Выполняет индивидуально подобранные комплексы оздоровительной или адаптивной физической культуры. УК-7.3. Выбирает и применяет рациональные способы и приемы сохранения физического здоровья, профилактики заболеваний, психофизического и нервно-эмоционального утомления
УК-8. Способен создавать и поддерживать в повседневной жизни и в профессиональной деятельности безопасные условия жизнедеятельности для сохранения природной среды, обеспечения устойчивого развития общества, в том числе при угрозе и возникновении чрезвычайных ситуаций и военных конфликтов	УК-8.1. Выявляет возможные угрозы для жизни и здоровья в повседневной и профессиональной деятельности. УК-8.2. Понимает, как создавать и поддерживать безопасные условия жизнедеятельности, том числе при возникновении чрезвычайных ситуаций и военных конфликтов. УК-8.3. Демонстрирует приемы оказания первой помощи
УК-9. Способен использовать базовые дефектологические знания в социальной и профессиональной сферах	УК-9.1. Применяет базовые дефектологические знания в социальной и профессиональной сферах УК-9.2. Применяет навыки взаимодействия в социальной и профессиональной сферах с лицами из числа инвалидов и лицами с ограниченными возможностями здоровья
УК-10. Способен принимать обоснованные экономические решения в различных областях жизнедеятельности	УК-10.1. Понимает основные проблемы, базовые принципы и законы функционирования экономики, роль государства в экономическом развитии УК-10.2. Понимает поведение потребителей и производителей экономических благ, особенности рынков факторов производства. УК-10.3. Понимает цели, виды и инструменты государственной экономической политики и их влияние на субъектов экономики УК-10.4. Применяет методы личного финансового планирования, использует финансовые инструменты для управления собственным бюджетом, контролирует личные финансовые риски
УК-11. Способен формировать нетерпимое отношение к проявлениям экстремизма, терроризма, коррупционному поведению и противодействовать им в профессиональной деятельности	УК-11.1. Знает законодательство, направленное на борьбу с экстремизмом, терроризмом, коррупцией УК-11.2. Понимает правовые нормы, обеспечивающие борьбу с экстремизмом, терроризмом, коррупцией в различных областях жизнедеятельности

общепрофессиональных

Код и наименование компетенции	*Код и наименование индикатора достижения компетенции*
ОПК-1. Способен применять правовые основы геологического изучения недр и недропользования, обеспечения экологической и промышленной безопасности и уметь их учитывать при поисках, разведке и эксплуатации месторождений полезных ископаемых, а также строительстве	ОПК-1.1 Понимает правовые основы недропользования, обеспечение экологической и промышленной безопасности ОПК -1.2 Применяет правовые основы геологического изучения недр и их использования для оценки экологической и промышленной безопасности.
ОПК-2. Способен применять методы и способы геолого-экономической оценки минерально-сырьевой базы и месторождений полезных ископаемых	ОПК-2.1 Понимает методы и способы геолого-экономической оценки месторождений полезных ископаемых. ОПК-2.2 Применяет методику геолого-промышленной оценки месторождений полезных ископаемых. ОПК-2.3 Выбирает методы и способы геолого-экономической оценки минерально-сырьевой базы страны.
ОПК-3. Способен применять основные положения фундаментальных естественных наук и научных теорий при проведении научно-исследовательских работ по изучению и воспроизводству минерально- сырьевой базы	ОПК-3.1 Выбирает основные положения естественных наук научных теорий при проведении научно-исследовательских работ по изучению и освоению минерально-сырьевой базы. ОПК-3.2 Использует основные положения естественных наук при проведении научно-исследовательских работ по изучению и пополнению минерально- сырьевой базы.
ОПК-4. Способен применять методы обеспечения безопасности жизнедеятельности, в том числе в условиях чрезвычайных ситуаций, при производстве работ по геологическому изучению недр, поискам, разведке, добыче и переработке полезных ископаемых, промышленно-гражданскому строительству	ОПК-4.1 Определяет методы обеспечения безопасности жизнедеятельности, в том числе в условиях чрезвычайных ситуаций, при производстве работ по геологическому изучению недр, поискам, разведке, добыче и переработке полезных ископаемых. ОПК-4.2 Реализует методы обеспечения безопасности жизнедеятельности, в том числе в условиях чрезвычайных ситуаций, при производстве работ на всех стадиях по геологическому изучению недр и переработке полезных ископаемых.
ОПК-5. Способен применять навыки анализа горно-геологических условий при поисках, оценке, разведке и добыче полезных ископаемых, а также при гражданском строительстве	ОПК-5.1 Анализирует горно-геологические условия при поисках, оценке, разведке и добыче полезных ископаемых, а также при гражданском строительстве ОПК-5.2 Реализует на практике анализ горно-геологических условий при поисках, оценке, разведке и добыче полезных ископаемых, а также при гражданском строительстве
ОПК-6. Способен работать с программным обеспечением общего, специального назначения, в том числе моделировать горные и геологические объекты	ОПК-6.1 Имеет представления о программном обеспечении общего и специального назначения. ОПК-6.2. Выбирает и применяет программное обеспечение общего, специального назначения, и создавать модели горные и геологические объекты
ОПК-7. Способен осуществлять техническое руководство горными и взрывными работами при поисках, разведке и разработке месторождений полезных ископаемых, гражданском строительстве, в том числе в условиях чрезвычайных ситуаций	ОПК-7.1 Имеет представление о методике технического руководства горными и взрывными работами на всех стадиях геологических работ. ОПК-7.2 Реализует техническое руководство горными и взрывными работами при геологоразведочных работах, гражданском строительстве, в том числе в условиях чрезвычайных ситуаций
ОПК-8. Способен применять основные методы, способы и средства получения, хранения и обработки информации, используя навыки работы с компьютером как средством управления информацией	ОПК-8.1 Предлагает основные методы, способы и средства получения, хранения и обработки информации, используя навыки работы с компьютером как средством управления информацией ОПК-8.2 Выбирает и применяет основные методы, способы и средства получения, хранения и обработки информации, используя навыки работы с компьютером как средством управления информацией
ОПК-9. Способен ориентироваться на местности, определять пространственное положение объектов, осуществлять необходимые	ОПК-9.1 Имеет представления об ориентировании на местности, определении пространственного положения объектов. ОПК-9.2 Свободно ориентируется на местности, определяет пространственное положение объектов, осуществляет необходимые

геодезические и маркшейдерские измерения, обрабатывать и интерпретировать их результаты	геодезические и маркшейдерские измерения, обрабатывает и интерпретирует их результаты
ОПК-10. Способен планировать, проектировать, организовывать геологоразведочные и горные работы, вести учет и контроль выполняемых работ, анализировать оперативные и текущие показатели производства, обосновывать предложения по совершенствованию организации производства, оперативно устранять нарушения производственных процессов	ОПК-10.1 Планирует, проектирует организацию геологоразведочных и горных работ, ведения учета и контроля выполняемых работ. ОПК-10.2. Анализирует оперативные и текущие показатели производства, обосновывает предложения по совершенствованию организации производства, оперативно устраняет нарушения производственных процессов.
ОПК-11. Способен в составе творческих коллективов и самостоятельно, контролировать соответствие проектов требованиям стандартов, техническим условиям и документам промышленной безопасности, разрабатывать, согласовывать и утверждать в установленном порядке технические и методические документы, регламентирующие порядок, качество и безопасность выполнения поисковых, геологоразведочных, горных и взрывных работ	ОПК-11.1 Контролирует соответствие проектов требованиям стандартов, техническим условиям и документам промышленной безопасности. ОПК-11.2 Разрабатывает, согласовывает и утверждает в установленном порядке технические и методические документы, регламентирующие порядок, качество и безопасность выполнения поисковых, геологоразведочных, горных и взрывных работ.
ОПК-12. Способен проводить самостоятельно или в составе группы научный поиск, реализуя специальные средства и методы получения нового знания, участвовать в научных исследованиях объектов профессиональной деятельности и их структурных элементов	ОПК-12.1 Применяет специальные средства и методы получения нового знания. ОПК-12.3 Самостоятельно или в составе группы участвует в научных исследованиях объектов профессиональной деятельности и их структурных элементов.
ОПК-13. Способен изучать и анализировать вещественный состав горных пород и руд и геолого-промышленные и генетические типы месторождений полезных ископаемых при решении задач по рациональному и комплексному освоению минерально-сырьевой базы	ОПК-13.1. Демонстрирует знания вещественного состава горных пород и руд и геолого-промышленных и генетических типов месторождений полезных ископаемых. ОПК-13.2 Анализирует вещественный состав горных пород и руд и геолого-промышленные и генетические типы месторождений полезных ископаемых при решении задач по рациональному и комплексному освоению минерально-сырьевой базы.
ОПК-14. Способен выполнять маркетинговые исследования, проводить экономический анализ затрат для реализации процессов геологоразведочного производства в целом	ОПК-14.1 Имеет представление о маркетинговых исследованиях, с проведением экономического анализа затрат на геологоразведочные работы ОПК-14.2 Осуществляет маркетинговые исследования, проводит экономический анализ затрат для реализации процессов геологоразведочного производства в целом.
ОПК-15. Способен участвовать в разработке и реализации образовательных программ в сфере своей профессиональной деятельности, используя профессиональные знания	ОПК-15.1 Разрабатывает и реализует образовательные программы в сфере своей профессиональной деятельности.

профессиональных

Код и наименование профессиональной компетенции	*Код и наименование индикатора достижения профессиональной компетенции*
ПК-1.1 Способен отслеживать тенденции и направления развития эффективных технологий геологической разведки, проявлением профессионального интереса к развитию смежных областей	ПК-1.1.1 Представляет тенденции и направления развития эффективных технологий геологической разведки ПК-1.1.2 Проявляет профессиональный интерес к развитию смежных областей

ПК-1.2. Способен проводить математическое моделирование и исследование геофизических процессов и объектов специализированными геофизическими информационными системами, в том числе стандартными пакетами программ	ПК-1.2.1 Имеет представление о математическом моделировании и исследовании геофизических процессов и объектов ПК-1.2.2 Специализированными геофизическими информационными системами, в том числе стандартными пакетами программ, проводит математическое моделирование и исследование геофизических процессов и объектов
ПК-1.3 Способен выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлекать для их решения соответствующий физико-математический аппарат	ПК-1.3.1 Выявляет естественнонаучную сущность проблем профессиональной деятельности ПК-1.3.2 Привлекает физико-математический аппарат в ходе профессиональной деятельности для решения конкретных задач
ПК-1.4. Способен выполнять поверку, калибровку, настройку и эксплуатацию геофизической техники в различных геолого-технических условиях	ПК-1.4.1 Имеет представление о ведении технической документации по поверке, калибровке, настройке и эксплуатации геофизической техники в различных геолого-технических условиях ПК-1.4.2 Выполняет поверку, калибровку, настройку и эксплуатацию геофизической техники в различных геолого-технических условиях
ПК-1.5. Способен разрабатывать комплексы геофизических исследований и методики их применения в зависимости от изменяющихся геолого-технических условий и поставленных задач изучения разрезов скважин и контроля разработки МПИ	ПК-1.5.1 Имеет представление о комплексах геофизических исследований, понятие контроля разработки месторождений полезных ископаемых ПК-1.5.2 Разрабатывает комплексы геофизических методов разведки и методики их применения в зависимости от изменяющихся геолого-технических условий и поставленных задач изучения разрезов скважин и контроля разработки МПИ
ПК-1.6 способен профессионально эксплуатировать современное геофизическое оборудование, оргтехнику и средства измерения	ПК-1.6.1 Профессионально эксплуатирует современное геофизическое оборудование, оргтехнику и средства измерения
ПК-1.7. Способен разрабатывать алгоритмы программ, реализующих преобразование геолого-геофизической информации на различных ступенях информационной модели ГИС	ПК-1.7.1 Использует знания об алгоритмах геофизических программ, о понятии преобразования геолого-геофизической информации ПК-1.7.2 Разрабатывает алгоритмы программ, реализующих преобразование геолого-геофизической информации на различных ступенях информационной модели ГИС
ПК-1.8. Способен выполнять правила безопасного труда и охраны окружающей среды на объектах геологоразведочных работ	ПК-1.8.1 Выполняет правила безопасного труда и охраны окружающей среды на объектах геологоразведочных работ

При выполнении выпускной квалификационной работы обучающиеся должны *показать*, опираясь на полученные знания, умения и полученные навыки:

сформированные универсальные, общепрофессиональные и профессиональные компетенции;

способность самостоятельно решать на современном уровне задачи своей профессиональной деятельности;

навыки постановки исследовательской проблемы, ее самостоятельного обсуждения, анализа возможных вариантов ее решения;

способность грамотно излагать специальную информацию, аргументировать и защищать свою точку зрения;

умение самостоятельного квалифицированного библиографического поиска, изучения и анализа научной литературы по теме;

навыки использования методологических, историко-философских и конкретных знаний, полученных в процессе обучения, для решения поставленной в работе проблемы;

умение написания профессионально грамотного текста и оформления его в соответствии с требованиями, предъявляемыми к научным публикациям;

использование в работе современных технологий.

1.1.3 Общие требования к выпускной квалификационной работе

Выпускная квалификационная работа должна отвечать следующим требованиям:

- быть актуальной (иметь теоретическое обоснование актуальности изучаемой проблемы в современных условиях хозяйственной деятельности);

- носить научно-исследовательский характер;

- представлять самостоятельное исследование, демонстрирующее способность выпускника решать профессиональные проблемы, делать на основе анализа геологической литературы соответствующие выводы и вносить предложения;

- отражать добросовестность обучающегося в использовании опубликованных материалов других авторов.

Общие требования к выпускной квалификационной работе – целевая направленность; четкость построения; логическая последовательность изложения материала; глубина исследования и полнота освещения вопросов; убедительность аргументаций; доказательность выводов и обоснованность рекомендаций; грамотное оформление.

Текст выпускной квалификационной работы должен демонстрировать:

– знакомство автора с литературой вопроса;

– умение выделить проблему и определить методы ее решения;

– умение последовательно изложить существо рассматриваемых вопросов, грамотно цитировать ведущих исследователей, делать ссылки на использованные источники;

– умение собирать, обобщать, анализировать практические материалы, полученные в результате собственного исследования в организации практики;

– достоверность и конкретность изложения фактических и экспериментальных данных о работе организации;

– обоснование выводов и предложений по результатам исследования, их конкретный характер, практическую ценность для решения исследуемых проблем;

– владение соответствующим понятийным и терминологическим аппаратом;

– четкость и логичность изложения мыслей, доказательность целесообразности и эффективности предлагаемых решений;

– приемлемый уровень языковой грамотности, включая владение функциональным стилем научного изложения.

1.1.4 Выбор, согласование и утверждение темы выпускной квалификационной работы

Выбор темы выпускной квалификационной работы осуществляется обучающимся по согласованию с руководителем ВКР и специалистами организации-базы практики, где будет проходить преддипломная практика. При выборе темы ВКР необходимо исходить из:

актуальности проблемы и значимости ее для научной и практической деятельности;

потребностей развития и совершенствования деятельности конкретной организации;

интересов, склонностей в научно-исследовательской работе обучающегося, а также перспектив его будущей профессиональной деятельности;

возможности получения информации для проведения анализа и обоснования предлагаемых решений.

Примерный перечень тем выпускных квалификационных работ разрабатывается выпускающей кафедрой и доводится до сведения обучающихся. Обучающийся может предложить свою тему, обосновав целесообразность ее разработки. Тема выпускной квалификационной работы может являться продолжением тем, ранее представленных обучающимся в рамках курсовых работ (проектов).

Для успешного выполнения выпускной квалификационной работы необходимо уже на первом этапе (выбор темы) четко сформулировать цель работы (отражающуюся в ее названии) и задачи.

После выбора темы, согласования ее с руководителем ВКР, обучающийся подает заявле-

ние на имя заведующего кафедрой об утверждении темы выпускной квалификационной работы (приложение 1).

Закрепление тем выпускных квалификационных работ за обучающимися оформляется приказом по университету. Следует иметь в виду, что **тема, утвержденная приказом ректора университета, изменению не подлежит**. Исключение могут составить лишь случаи возникновения объективных непреодолимых препятствий к ее разработке. Изменение оформляется приказом по университету на основании письменного заявления обучающегося и представления заведующего кафедрой.

1.1.5 Структура и содержание выпускной квалификационной работы

Структурные элементы выпускной квалификационной работы **перечислены ниже в порядке их расположения и брошюровки.**

1. Титульный лист (приложение 2)
2. Сопроводительные документы к выпускной квалификационной работе:

2.1 Задание на выполнение выпускной квалификационной работы (приложение 3).

2.2 Отзыв руководителя ВКР (приложение 4).

2.3 Отзыв рецензента (приложение 5).

2.4 Если результаты исследования нашли практическое применение, то прилагается документ, подтверждающий внедрение результатов исследования в практическую деятельность (приложение 6)

2.5 Справка о проверке с системе «Антиплагиат. ВУЗ» (приложение 7).

3. Содержание (приложение 8).
4. Введение.
5. Основная часть работы.
6. Заключение.
7. Список использованных источников (приложение 9).
8. Приложения.

Титульный лист должен содержать все необходимые идентификационные признаки, в частности, название работы, указание автора работы, руководителя.

На титульном листе подписью руководителя, консультанта (при наличии) подтверждается допуск выпускной квалификационной работы к защите.

Титульный лист учитывается в общей нумерации страниц выпускной квалификационной работы, порядковый номер на титульном листе не ставится.

Сопроводительные документы подшиваются следом за титульным листом работы, но в общей нумерации страниц выпускной квалификационной работы они не учитываются и порядковые номера на них не ставятся.

Цель составления *задания на выполнение выпускной квалификационной работы* – уяснение замысла работы и поставленных в ней основных проблем. Оформление задания на работу предполагает составление под контролем руководителя ВКР плана будущей работы.

Наличие *содержания* (плана работы) позволяет уйти от освещения вопросов, не относящихся к теме работы, обеспечить четкость и последовательность изложения материала, избежать пробелов и повторений, рационально организовать самостоятельный труд, сэкономить время.

Содержание работы помещают после справки о внедрении (если она есть). Слово «СОДЕРЖАНИЕ» записывают в виде заголовка симметрично тексту прописными буквами. В содержании работы указывается перечень всех глав и параграфов выпускной квалификационной работы, а также номера страниц, с которых начинается каждый из них (точно по тексту). Главы

в выпускной квалификационной работе должны иметь в пределах всей работы порядковые номера, обозначенные арабскими цифрами. Параграфы каждой главы должны иметь нумерацию в пределах каждой главы. Номер параграфа состоит из номера главы и непосредственно номера параграфа в данной главе, отделенного от номера главы точкой. Заголовки содержания должны точно повторять заголовки в тексте. Сокращать или давать их в другой формулировке, последовательности и соподчиненности по сравнению с заголовками в тексте нельзя.

При этом надо иметь в виду, что названия глав и параграфов не должны дублировать друг друга, а также наименование темы работы. Каждая глава должна раскрывать часть темы, каждый параграф главы – часть содержания главы.

Введение, заключение, список использованных источников включают в содержание, но не нумеруют.

Пример оформления содержания выпускной квалификационной работы приведен в приложении 8.

Страницы содержания учитываются в общей нумерации страниц выпускной квалификационной работы, порядковый номер на странице не ставится.

Выполнение выпускной квалификационной работы рекомендуется начинать с написания «ВВЕДЕНИЯ». Естественно, в процессе исследования первичный текст введения будет меняться, иногда очень существенно. Но это не отрицает необходимости на начальном этапе поставить перед собой задачи исследования, отражаемые во введении.

«ВВЕДЕНИЕ» в общем случае имеет следующую структуру:

актуальность выбранной темы,

формулировка цели и определение конкретных задач исследования (они найдут отражение в содержании работы),

выбор объекта и предмета исследования,

информационная база исследования;

структура выпускной квалификационной работы.

Во введении следует коротко сформулировать актуальность темы исследования, т.е. причину возникновения проблемы и ее суть. Актуальность определяется как значимость, важность и приоритетность выбранной темы исследования среди других тем. Она должна подтверждаться положениями и доводами, свидетельствующими в пользу научной и практической значимости решения проблем и вопросов, исследуемых в работе. Необходимо объяснить, почему именно выбранная тема представляет интерес на современном этапе развития. Обоснование актуальности темы работы не должно быть многословным. Главное – показать, как автор оценивает своевременность и социальную значимость выбранной темы.

От доказательства актуальности следует перейти к формулировке цели исследования. Цель исследования – это образ желаемого результата, то, что намерен достичь автор работы.

Цель выпускной квалификационной работы должна соответствовать названию темы. Цель работы формулируется кратко и точно. Например, «Цель выпускной квалификационной работы – составление проекта на проведение эксплуатационной разведки в пределах северной части дайки Елизаветинская Березовского золоторудного месторождения». Конкретизация це- ли осуществляется в задачах исследования. «Исходя из поставленной цели, были поставлены следующие задачи выпускной квалификационной работы:

- обоснование методики эксплуатационной разведки;
- выбор технологии проходки горных выработок
- составление сметы на проведение проектируемых видов работ;
- расчет основных геолого-экономических показателей;
- оценка запасов по категории C_1».

Формулировки задач необходимо делать очень тщательно, так как описание их решения должно составить содержание последующих глав (параграфов) выпускной квалификационной работы.

Объект исследования – это процесс или явление, порождающее проблемную ситуацию и избранное для исследования. Выделение объекта происходит на основе анализа проблемы исследования.

Предмет исследования – это та часть объекта, которая и будет исследована. Предмет должен характеризовать тему выпускной квалификационной работы и включать в себя свойства и стороны объекта, которые следует рассмотреть в заявленной теме, установив пределы рассмотрения данного вопроса. Объект и предмет исследования соотносятся как общее и часть общего.

Объект и предмет исследования можно сформулировать так: «Объект исследования – Березовское золоторудное месторождение.

Предмет исследования – северная часть дайки Елизаветинская Березовского золоторудного месторождения».

Далее дается характеристика методов исследования. Методы исследования – основные приемы и способы, которые использовались при проведении исследования (диалектический метод, исторический метод, статистический и др.). В процессе обработки полученных данных практически всегда используются такие взаимосвязанные научные методы исследования, как анализ и синтез. Анализ – логический прием разделения целого на отдельные элементы и изучение каждого в отдельности и во взаимосвязи с целым. Синтез – объединение результатов для формирования (проектирования) целого.

После того, как сформулированы цель, задачи, объект и предмет, методы исследования, следует указать информационную базу и структуру ВКР:

«Информационная база выпускной квалификационной работы включает: труды ведущих отечественных и зарубежных авторов, посвященных проблемам ….., статьи, опубликованные в периодических изданиях, а также Интернет-ресурсы, …., статистические материалы.

Выпускная квалификационная работа состоит из введения, трех глав основного текста, заключения, списка использованных источников, приложений. Содержание работы изложено на 62 страницах машинописного текста и включает 2 таблицы. Библиографический список состоит из 35 источников».

Введение не должно превышать 2-3 страницы компьютерного набора.

Страницы введения учитываются в общей нумерации страниц работы, номер страницы проставляется.

Основная часть выпускной квалификационной работы

Основная часть работы состоит из разделов:

1 Геологический раздел

2 Методический раздел

3 Технический раздел

4 Экономический раздел

Текст работы излагается самостоятельно (не допускается дословное переписывание использованной литературы), последовательно, грамотно и аккуратно, при написании работы необходимо употреблять профессиональные термины, избегать сложных грамматических оборотов. Студент должен показать не только знание материала, но и умение разбираться в нем, творчески использовать основные положения источников. Материал, используемый из других источников, должен быть переработан, органически увязан с избранной студентом темой и изложен своими словами с приведением ссылок на источники информации.

Содержание выпускной квалификационной работы должно демонстрировать:

знакомство автора с учебной и научной литературой по теме выпускной квалификационной работы;

умение обобщать материал литературных источников, анализировать геологическую информацию, выявлять особенности геологических объектов, являющихся предметом исследования, выделить проблему и определить пути ее решения, последовательно изложить существо рассматриваемых вопросов, делать самостоятельные выводы;

владение понятийным и терминологическим аппаратом.

В тексте выпускной квалификационной работы следует избегать использования личных местоимений, заменяя их безличными формами (вместо «я считаю» - «автор считает», «мы полагаем»).

Рекомендуется использование вводных и соединительных слов – *таким образом, из этого следует, в связи и т.д.* – для подчеркивания причинно-следственных связей и выражения личного отношения к излагаемому материалу.

Все страницы основной части выпускной квалификационной работы участвуют в общей нумерации страниц, номера страниц проставляются.

«ЗАКЛЮЧЕНИЕ» выполняет роль концовки, обусловленной логикой проведенного исследования. Оно содержит изложение полученных итогов и их соотношение с общей целью и конкретными задачами, поставленными и сформулированными во введении. Именно здесь содержится «выводное» знание, полученное в результате исследования. В заключении указывается вытекающая из конечных результатов теоретическая и практическая ценность, значимость. Заключительная часть предполагает обобщенную итоговую оценку проделанной работы.

В «ЗАКЛЮЧЕНИИ» находят отражение основные положения и выводы, содержащиеся во всех главах работы. В нем отражаются степень решения поставленных задач, полученные результаты, указывается также где, и каким образом применение рекомендаций может принести практическую пользу в деятельности организации.

Объем заключения – 2-3 страницы.

Нумерация страниц, на которых приводится текст заключения, должна продолжать общую нумерацию страниц основного текста.

Список использованных источников является составной частью работы и отражает степень изученности рассматриваемой проблемы. При этом в список использованных источников включаются, как правило, те источники, на которые в работе имеются библиографические ссылки. Использованные источники должны содержать их полное описание по требованиям стандартов.

Порядок оформления списка использованных источников представлен в приложении 9.

Нумерация страниц, на которых приводится текст списка использованных источников, должна продолжать общую нумерацию страниц основного текста.

В *приложения* следует выносить вспомогательный материал, который при включении в основную часть работы загромождает текст.

К вспомогательному материалу относятся таблицы цифровых данных, инструкции, методики, иллюстрации вспомогательного характера, заполненные формы документов, выдержки из локальных нормативных актов и др.

Нумерация страниц, на которых даются приложения, должна продолжать общую нумерацию страниц основного текста.

Объем выпускной квалификационной работы должен составлять – 60 - 80 страниц компьютерного набора (без приложений).

При выполнении выпускной квалификационной работы обучающийся должен продемонстрировать навыки работы на персональном компьютере (например, статистическая обработка материалов, выполнение графических построений, проведения математических расчетов, использование программного обеспечения для решения конкретных задач, поставленных в работе).

1.1.6 Руководство выпускной квалификационной работой

Общее руководство и контроль за ходом выполнения ВКР осуществляет выпускающая кафедра в лице руководителя ВКР. Руководитель ВКР:

помогает обучающемуся с выбором темы и разработкой плана работы;

оформляет задание на выполнение выпускной квалификационной работы;

оказывает обучающемуся помощь в разработке календарного графика на весь период выполнения выпускной квалификационной работы;

рекомендует обучающемуся необходимую литературу;

систематически контролирует ход работы и информирует кафедру о состоянии дел;

дает подробный отзыв на законченную работу.

Проверяя работу, руководитель не должен превращаться в корректора или редактора, хотя замечания в этой части он тоже высказывает. Руководитель ВКР выявляет полноту, глубину и всесторонность рассмотрения поставленных в плане вопросов, последовательность изложения материала, достаточность использования литературы, аргументированность выводов, степень их обоснованности и самостоятельности. В случае обнаружения плагиата, ошибочных решений и научных положений по тем или иным вопросам, неполноты или поверхностности исследования, противоречивости, излишнего отклонения от темы и других недостатков руководитель предлагает выпускнику устранить их, рекомендует пути и сроки их устранения.

Руководитель ВКР помогает выпускнику на всех этапах его работы, но эта помощь не должна выливаться в соавторство. Отношения руководителя со обучающимся строятся на основе сотрудничества.

1.2 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1.2.1 Основные этапы выполнения выпускной квалификационной работы

Соблюдение установленных сроков и последовательности выполнения выпускной квалификационной работы направлено на оптимизацию процесса достижения поставленных целей.

Рекомендуется следующая последовательность этапов выполнения выпускной квалификационной работы:

выбор темы работы, её утверждение;

подбор литературы, геологической документации и ознакомление с ними, составление литературного обзора по проблеме исследования;

сбор и обобщение аналитических материалов, анализ;

написание работы и представление её руководителю, доработка по замечаниям руководителя;

написание введения и заключения, подготовка списка использованных источников, приложений, представление работы руководителю ВКР;

прохождение нормоконтроля, исправление замечаний по оформлению работы;

проверка в системе «Антиплагиат. ВУЗ»;

размещение работы в портфолио;

подготовка к защите выпускной квалификационной работы: подготовка презентационных материалов, оформление документов на выпускную квалификационную работу.

1.2.2 Подготовка к защите выпускной квалификационной работы

Законченная ВКР, подписанная студентом, передается научному руководителю для проверки соответствия оформления работы предъявляемым требованиям и составления письменного отзыва руководителя. В отзыве руководителя указываются сведения об актуальности темы работы, достоинства и недостатки работы, практическая ценность работы, оценка подготовленности студента, инициативности и самостоятельности при решении задач выпускной квалификационной работы, умение студента работать с литературными источниками, и способность ясно и четко излагать материал, соблюдение правил и качества оформления работы. Особое внимание уделяется оценке выпускника по личностным характеристикам (ответственность, дисциплинированность, самостоятельность, активность, творчество, инициативность и т.д.), проявленным способностям к исследовательской деятельности, достигнутым результатам в формировании компетенций выпускника данной программы, мотивируется возможность или невоз-

можность представления выпускной квалификационной работы на защиту в государственной экзаменационной комиссии.

Решение научного руководителя является основанием для допуска кафедрой ВКР к защите. Допуск работы к защите производится заведующим выпускающей кафедры.

Текст ВКР должен быть проверен на объем заимствований в системе «Антиплагиат», отчет печатается. ВКР размещается в портфолио. Размещение ВКР – не позднее, чем за 3 дня до защиты.

Перед защитой студентом представляются в ГЭК следующие документы:

1) ВКР, подписанная на титульном листе выпускником, научным руководителем, консультантами (если есть) (Приложение А);

2) задание на выполнение работы с отметками сроков окончательной подготовки работы, подписанное научным руководителем и заключением кафедры о допуске к защите;

3) отзыв научного руководителя;

4) отзыв рецензента;

5) отчет о проверке в системе «Антиплагиат».

Готовясь к защите работы, студент составляет тезисы выступления, содержащего наиболее важные и интересные результаты исследования. При этом следует помнить о том, что выпускнику для доклада отводится ограниченное время;

оформляет наглядные пособия, раздаточный материал к докладу, продумывает ответы на замечания рецензента.

Работу над тезисами доклада следует начинать сразу же после представления работы на кафедру и продолжить после ознакомления с отзывом руководителя. На вопросы и замечания отзыва целесообразно подготовить письменные ответы.

Доклад на защите выпускной квалификационной работы, как правило, не должен превышать 7-10 мин. Следует помнить, что студент не просто излагает, а защищает положения своей работы.

1.2.3 Защита выпускной квалификационной работы

Защита выпускной квалификационной работы проводится на открытом заседании ГЭК.

Порядок защиты:

-председатель ГЭК объявляет фамилию, имя и отечество выпускника, название работы с указанием места ее выполнения;

-доклад продолжительностью, как правило, не более 7-10 минут, в течении которых он должен кратко сформулировать актуальность, цель и задачи работы, изложить основные результаты, выводы и рекомендации, конкретные предложения, обосновать возможность их реализации, эффективность. При этом необходимо уточнить личный вклад в разработку проблемы.

Студент может пользоваться заранее подготовленным тезисами доклада, но должен излагать основное содержание своей выпускной квалификационной работы свободно, не читая письменного текста. При чтении утрачивается эмоциональность изложения, монотонное чтение текста не привлекает внимания и утомляет слушателей. Свободный рассказ по теме свидетельствует об уровне подготовки и глубине специальных знаний по проблеме выпускной квалификационной работы. Все это существенно влияет на итоговую оценку работы.

Все принципиальные положения выпускной квалификационной работы для большей наглядности могут быть представлены на демонстрационном материале. К демонстрационным материалам относится информация из выпускной квалификационной работы (таблицы, диаграммы, схемы, иллюстрации и пр.), оформленная в виде презентаций или ксерокопий для каждого члена ГЭК. Во время доклада необходимо ссылаться на эти материалы;

-после окончания доклада члены ГЭК и присутствующие на защите предлагают выпускнику вопросы, касающиеся устного выступления, имеющие непосредственное отношение к теме работы, или же просто в связи с обсуждаемой проблемой;

- зачитывается внешняя рецензия на выпускную квалификационную работу;

-выступление руководителя выпускной квалификационной работы, а в случае его отсутствия секретарь ГЭК зачитывает отзыв руководителя;

- председатель ГЭК предоставляет желающим слово для выступления, затем выпускнику, которое предполагает ответы на замечания рецензента и всех, выступивших при обсуждении работы, после чего объявляет об окончании защиты.

После окончания открытой защиты проводится закрытое заседание ГЭК (возможно с участием руководителей), на котором определяются итоговые оценки по четырехбалльной системе («отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно»). После закрытого обсуждения председатель объявляет решение ГЭК. Протокол заседания ГЭК ведется секретарем. В него вносятся все заданные вопросы, особые мнения, решение комиссии об оценке.

II КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ВЫПОЛНЕНИЯ И ЗАЩИТЫ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Оценка выпускной квалификационной работы производится по четырем группам критериев:

Система оценивания по оценочным средствам государственной итоговой аттестации

Оценочное средство	Максимальная стоимость в баллах	Критерии начисления баллов
Выпускная квалификационная работа	0-70 балл	Качество выполненной работы, ее научно-теоретический уровень, степень самостоятельности и логичность изложения материала, правильность оформления и результат ее защиты
Отзыв руководителя ВКР	0-10 баллов	Ответственность, дисциплинированность, стремление к достижению высоких результатов самостоятельность, добросовестность в выполнении ВКР, контактность….
Отзыв рецензента ВКР	0-10 баллов	Теоретическая значимость исследования; анализ представленных методик исследования; практическая значимость исследования; степень полноты обзора состояния проблемы и корректность постановки задачи; уровень и корректность использования в работе методов исследования
Ответы на вопросы (проверка компетенций)	0-10 баллов	Полнота и правильность ответа
Итого	100 баллов	

Оценка по итогам государственной итоговой аттестации определяется простым суммированием баллов:

Критерии оценки	*Количество баллов*
Критерии содержания ВКР	
обоснованность выбора и актуальность темы исследования	0-5
обоснование практической и теоретической значимости исследования	0-5
уровень теоретической проработки проблемы, осмысления теоретических вопросов и обобщения собранного материала	0-5
умение представить литературный обзор проблемы исследования; широта и	0-5

качество использованных источников	
объем и уровень анализа профессиональной, научной литературы, релевантность, полнота, корректность и содержание цитирования	0-5
наличие в ВКР результатов, которые в совокупности решают конкретную научную и (или) практическую задачу, или - результатов (теоретических и (или) экспериментальных), которые имеют существенное значение для развития конкретных направлений в определенной отрасли науки (деятельности), или – научно-обоснованных разработок, использование которых в полном объёме обеспечивает решение прикладных задач	0-5
умение логические верно, аргументированно и ясно излагать материалы исследования в ВКР: обоснованность и четкость сформулированных выводов	0-5
умение использовать компьютерные технологии в режиме пользователя для решения профессиональных задач	0-5
Критерии оформления ВКР	0-10
владение научным стилем изложения, орфографическая и пунктуационная грамотность	0-5
соответствие формы представления работы требованиям, предъявляемым к оформлению данных работ	0-5
Критерии процедуры защиты	0-15
качество устного доклада: соответствие доклада содержанию работы, логичность, точность формулировок, обоснованность выводов, культура речи; владение профессиональной терминологией и навыками профессиональной аргументации	0-5
презентационные навыки: структура и последовательность изложения материала, соблюдение временных требований, использование презентационного оборудования и/или раздаточного материала, грамотность оформления иллюстрационных материалов, выразительность использования, контакт с аудиторией	0-5
поведение при защите (коммуникационные характеристики (культура) докладчика (речь, манера говорить, отстаивать свою точку зрения, привлекать внимание к важным моментам в докладе или ответах на вопросы)	0-5
качество ответов на вопросы членов ГЭК: логичность, глубина, правильность и полнота ответов	0-5
Отзыв рецензента ВКР	0-10
теоретическая значимость исследования; анализ представленных методик исследования; практическая значимость исследования; степень полноты обзора состояния проблемы и корректность постановки задачи; уровень и корректность использования в работе методов исследования; степень комплексности работы, применение в ней знаний социально-гуманитарных дисциплин, естественно-математических, общепрофессиональных и специальных дисциплин; ясность, четкость, последовательность и обоснованность изложения.	0-10
Отзыв руководителя ВКР	0-10
ответственное отношение к работе, дисциплинированность, стремление к достижению высоких результатов, самостоятельность, добросовестность в выполнении работы, соблюдение сроков представления материалов, контактность	0-5
владеет навыками самостоятельного получения новых знаний, использования современных технологий	0-5
Теоретические вопросы	0-10

качество ответов на вопросы членов ГЭК: правильность и полнота ответов	0-10
Итого баллов	100

Правила оценивания результатов защиты ВКР

80-100 баллов (80-100%) – оценка **«отлично»; 65-79 баллов** (65-79 %) – оценка **«хорошо»;**
50-64 балла (50-69%) – оценка **«удовлетворительно;**
0-49 баллов (0-49%) – оценка **«неудовлетворительно».**

III ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Оценочными средствами результатов обучения на этапе государственной итоговой аттестации являются выпускная квалификационная работа (в которой выпускнику предлагается по поставленной научно-практической проблеме сформулировать самостоятельно гипотезы, цель, сделать разработку программы эмпирического исследования, собрать информацию, проанали- зировать ее, провести необходимые расчеты, построить модели, предложить варианты решения проблемы и обосновать показатели оценки результативности) и ее защита по установленной процедуре (доклад, презентация, ответы на вопросы государственной экзаменационной комис- сии), позволяющей сделать вывод о сформированности компетенций, теоретические вопросы.

3.1 ПРИМЕРНАЯ ТЕМАТИКА ВЫПУСКНЫХ КВАЛИФИКАЦИОННЫХ РАБОТ

1. Проект комплексных геофизических исследований скважин с целью контроля разработки нефтяного месторождения`
2. Проект исследований методом ВИКИЗ на Уренгойском месторождении с целью выделения коллекторов и оценки характера насыщения.
3. Проект ГИС ‹: целью контроля разработки Вахского месторождения нефти в Томской области.
4. Проект промыслово-геофизических работ на Покачевском нефтяном месторождении с целью контроля за разработкой.
5. Проект ГИС при разведке хромитовых руд месторождения Западное Полярного Урала.
6. Проект геофизических исследований скважин с целью доразведки Тайлаковского месторождения нефти (ХМАО)
7. Проект геофизических исследований с целью доразведки месторождений нефти на Рогожниковском лицензионном участке (Тюменская область).
8. Применение импульсного спектрометрического нейтронного гамма-каротажа для определения характера насыщения неперфорированных пластов на Ватьеганском нефтяном месторождении Тюменской области.
9. Определение коэффициента пористости коллекторов по комплексу методов ГИС на Тэдинском месторождении Тимано-Печорской провинции.
10. Анализ информативности геофизического сопровождения освоения скважин струйными насосами на Новинском месторождении нефти.
11. Определение профиля приемистости с использованием метода термометрии на примере Ен-Еловской площади.
12. Исследования горизонтальных скважин Нивагальского нефтяного месторождения автономной геофизической аппаратуры.
13. Применение ГИС при возбуждении скважин свабированием и компрессированием в условиях Тевлино-Русскинского месторождения нефти.
14. Оценка качества цементирования нефтяных скважин Ватьеганского месторождения методами ГИС.

15. Применение станций геолого-технологических исследований для диагностики и предупреждения аварийных ситуаций при проводке нефтегазовых скважин в Западной Сибири.
16. Интерпретация ГИС с целью оценки промысловых характеристик коллекторов на Бахиловском нефтяном месторождении Западной Сибири.
17. Оценка эффективности гидравлического разрыва пластов методами ГИС.
18. геофизических приборов в контроле за разработкой нефтяных месторождений.

3.2 *Теоретические вопросы государственной итоговой аттестации, оценивающие сформированность универсальных компетенций:*

1. Каково значение коммуникативных навыков для успешной деятельности производ- ственного коллектива?
2. В чем вы видите основные причины необходимости овладения навыками общения на иностранном языке для успешного решения профессиональных задач в современных условиях?
3. В чем проявляется толерантность в восприятии социальных, этнических, конфессио- нальных и культурных различий?
4. Чем обусловлена необходимость овладения правовой культурой для достижения высоких экономических результатов в современных условиях?
5. Какая формулировка образовательных потребностей специалиста в современных условиях является более актуальной: «образование для всей жизни» или «образование в течение всей жизни»?
6. Возможна ли успешная профессиональная самореализация работника без формирования потребности и способности к самоорганизации и самообразованию?
7. В чем вы видите значение здорового образа жизни, овладения методами и средствами физической культуры для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности?
8. Чем обусловлена в настоящее время необходимость овладения приемами первой помощи, методами защиты в условиях чрезвычайных ситуаций?

3.3 *Теоретические вопросы государственной итоговой аттестации, оценивающие сформированность общепрофессиональных компетенций:*

1 В чем Вы видите основные причины необходимости овладения навыками логически верно, аргументированно и ясно строить устную и письменную речь?
2 Зачем необходимо повышать уровень своей профессиональной компетентности?
3 В чем вы видите основные причины необходимости овладения навыками профессионального общения на иностранном языке?
4 Какие информационные технологии использовались при выполнении работы?
5 Какие профессиональные задачи были решены при выполнении работы?
6 Какие методы применялись при выполнении экономической оценки объекта?
7 Каково значение информации в развитии современного информационного общества?
8 Какие методы защиты производственного персонала и населения от возможных последствий аварий предусмотрены в проекте?
9 Аналитическая база, используемая при выполнении работы?
10 Как вы оцениваете свой вклад в представленную работу?

3.3 *Теоретические вопросы государственной итоговой аттестации, оценивающие сформированность профессиональных компетенций:*

1 Проанализировав геологическую ситуацию в пределах участка, сформулируйте необходимость постановки конкретной стадии геологоразведочных работ на объекте?

2 Преедпосылки к проведению геофизических работ?

3 Геофизические работы текущего года?

4 Выбор комплекса методов?

5 Какие специализированные компьютерные программы использованы для обработки фактического материала?

6 Обоснуйте необходимость применения запроектированных геофизических методов?

7. Какова рентабельность проектируемых работ?

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Форма заявления на утверждение темы выпускной квалификационной работы

Зав. кафедрой _
_____
обучающегося группы _____
_____

Заявление
на утверждение темы выпускной квалификационной работы

Прошу утвердить тему выпускной квалификационной работы (из числа предложенных университетом):

_____
_____

Прошу утвердить самостоятельно определенную тему выпускной квалификационной работы

_____
_____

Место прохождения производственной (преддипломной) практики:

_____
_____

Руководитель ВКР _____
(Ф.И.О., ученая степень, ученое звание, должность)

Дата _ Подпись обучающегося _

Решение зав. кафедрой

«УТВЕРЖДАЮ»

_____

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Форма оформления титульного листа выпускной квалификационной работы

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(БАКАЛАВРИАТ/СПЕЦИАЛИТЕТ /МАГИСТРАТУРА)

ТЕМА: _

_____

Факультет:_____

Направление/Специальность:

_____

Профиль/специализация:

_____

Квалификация:

_____

Кафедра:

Обучающийся: _____(*подпись*)
Фамилия И.О.
Группа:

*Руководитель:*_____(*подпись*)
Фамилия И.О.

Консультант: (*подпись*)
Фамилия И.О.

_____
(подпись)
Допустить к защите:

Зав.кафедрой

(Фамилия И.О., ученая степень, ученое звание)

Екатеринбург
2021

Пример оформления задания на выполнение выпускной квалификационной работы

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Уральский государственный горный университет»
(ФГБОУ ВО «УГГУ»)

Факультет геологии и геофизики
Кафедра геофизики (ГФ)
Специальность 21.05.03 "Технология геологической разведки"
Специализация "Геофизические методы поисков и разведки МПИ"

«Утверждаю»
Заведующий кафедрой _____
«___» _____ 201 г.

ЗАДАНИЕ
ПО ДИПЛОМНОМУ ПРОЕКТИРОВАНИЮ

Студенту Ларионовой Юлии Валерьевне
(фамилия, имя, отчество полностью)

1. Тема дипломного проекта (работы) Проект акустико-геофизических исследований скважин Северо-Уренгойского месторождения с целью определения газоводяного контакта
утверждена приказом по университету № 1 от «___» _____ 201 г.
2. Срок сдачи студентом дипломного проекта (работы) «15» июня 2019 г.
3. Исходные данные к дипломному проекту (работе)
1. Материалы производственной практики
2. Литературные источники

4. Содержание расчетно – пояснительной записки:
4.1. Общий раздел
Введение
1. Общие сведения о районе работ
2. Геологическое строение района работ и месторождения
3. Геологические и физические предпосылки к постановке

4.2. Технологический раздел
геофизических исследований скважин
4. Анализ ранее проведенных геофизических исследований
5. Методика проектируемых работ
6. Спецглава: "Изучение пространственного распределения нейтронов при проведении нейтрон-нейтронного каротажа"

4.3. Специальный раздел
7. Производственно-техническая часть проекта
8. Безопасность жизнедеятельности
Заключение

4.4. Экономическое обоснование
смета

4.5. Безопасность жизнедеятельности

Охрана окружающей среды
Охрана труда на предприятии

5. Графический материал

1. Обзорная карта Северо-Уретойского месторождения
2. Литолого-стратиграфическая колонка
3. Тектоническая карта
4. Карта-геофизические характеристики пород разреза
5. Аппаратура ГИС
6. Диаграммы ГИС
7. Иллюстрации к спецглаве

6. Консультанты по разделам дипломного проекта (работы):

Фамилия, имя, отчество	Место работы, должность, ученая степень, звание	Раздел дипломного проекта (работы)
Кузьмин В.С.	доцент, к.т.-н.н.	2
Жуков В.Г.	доцент, к.э.н.	7

Ф., И., О. руководителя дипломного проекта (работы) Александрова Ш.Н.
Ученая степень к.т.-н.н. ученое звание доцент

7. График выполнения дипломного проекта (работы)

Наименование раздела дипломного проекта	Срок выполнения
Введение, глава 1, глава 2	25.05.19
Глава 3, глава 4, глава 5	01.06.19
Глава 6, глава 7, глава 8, заключение	15.06.19

Дата выдачи задания «20» мая 2019 г.
Руководитель дипломного проекта (работы) _____ (подпись)
Задание по дипломному проектированию получил _____ (подпись)

Примечание: Задание оформляется в 2-х экземплярах, один из которых хранится на кафедре
Другой выдается студенту и подшивается к расчетно – пояснительной записке.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Примерная форма отзыва руководителя выпускной квалификационной работы

ОТЗЫВ РУКОВОДИТЕЛЯ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Выпускная квалификационная работа выполнена
Обучающимся _____
Направление подготовки _____
/специальность _____
Кафедра _____
Группа _____
Руководитель ВКР _____

Общая характеристика работы студента в период выполнения ВКР: _____
_____
_____

Актуальность темы _____
_____

Степень достижения целей ВКР _____
_____

Общая характеристика теоретической части (глубина разработки проблемы, логика изложения и проч.) _____

Общая характеристика практической части работы (наличие элементов практической новизны, наличие и значимость практических предложений и рекомендаций) _____

Степень владения профессиональными знаниями, умениями и навыками _____
_____

Замечания к ВКР _____
_____

Заключение: _____

Руководитель: _____ «___» 20 г.
подпись

Обучающийся: _____ «___»_____20 г.
подпись

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Примерная форма отзыва рецензента о выпускной квалификационной работе

ОТЗЫВ
РЕЦЕНЗЕНТА О ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ

Фамилия И.О. выпускника _____
Специальность _____
Профиль/специализация _____
_____

Тема рецензируемой работы _____
Рецензент место работы, должность (при наличии) _____
_____

Заключение о степени соответствия выпускной квалификационной работы заданию_

Оценка теоретической части ВКР (теоретическая значимость исследования, анализ использованных источников)_

_____

Оценка аналитической части ВКР (анализ представленных методик исследования)_

_____

Оценка проектной части ВКР (практическая значимость исследования)_

_____

Логичность, четкость, грамотность изложения материала _____

_____

Оценка сформированности компетенций, предусмотренных федеральным государственным образовательным стандартом:

ВКР демонстрирует (высокий, средний, низкий) уровень сформированности универсальных компетенций и (высокий, средний, низкий) уровень сформированности общепрофессиональных и профессиональныхкомпетенций.

Замечания и рекомендации (к публикации, внедрению, представлению на конкурс) по ВКР_

_____

Общая оценка ВКР _____

Рецензент: _____ Фамилия И.О. Обучающийся: _____ Фамилия И.О.
(подпись) (подпись)

«____»_____20 г. «____»_____20 г.

М.П

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

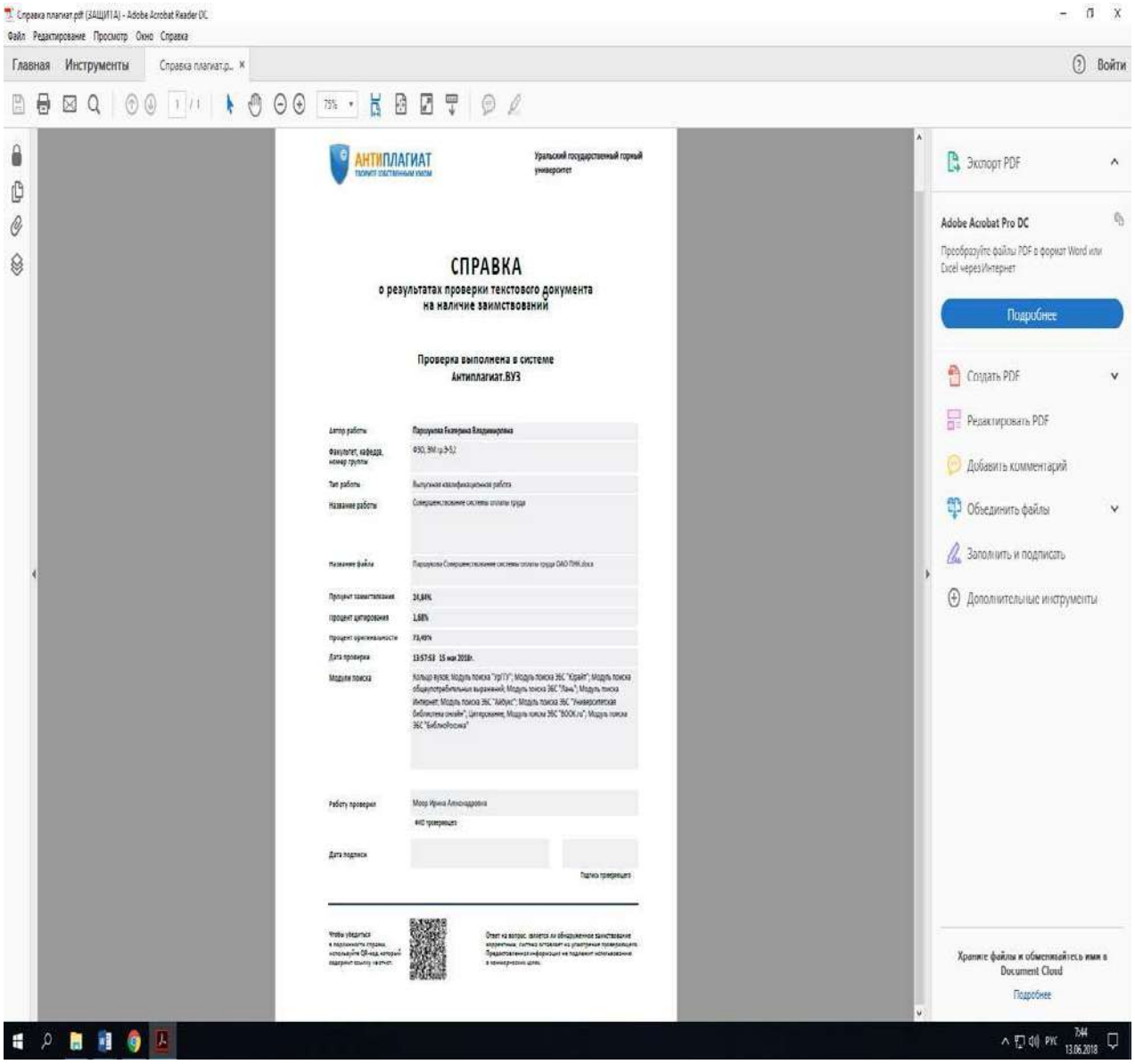
Пример оформления документа, подтверждающего использование результатов выпускной квалификационной работы

СПРАВКА
об использовании результатов выпускной квалификационной работы
на тему: «Проект ГИС с целью определения ФЕС Федоровского нефтяного месторождения»

Выводы и предложения, представленные в исследовании Жуклина Е.А., нашли применение в практической деятельности.

Рекомендации автора по совершенствованию методики определения ФЕС взяты за основу при разработке перспективных направлений развития.

Директор Фамилия И.О.
ВНИИГИС (подпись)
М.П.



Справка плагиат.pdf (ЗАЩИТА) - Adobe Acrobat Reader DC

Файл Редактирование Просмотр Окно Справка

Главная Инструменты Справка плагиат.р... Войти

АНТИПЛАГИАТ

Уральский государственный горный университет

СПРАВКА

о результатах проверки текстового документа на наличие заимствований

Проверка выполнена в системе Антиплагиат.ВУЗ

Автор работы	Паршукова Екатерина Владимировна
Факультет, кафедра, номер группы	ФЭО, ЭМ гр.5-5.2
Тип работы	Выпускная квалификационная работа
Название работы	Совершенствование системы оплаты труда
Название файла	Паршукова Совершенствование системы оплаты труда ОАО ПНК.docx
Процент заимствования	24,84%
процент цитирования	1,68%
процент оригинальности	73,48%
Дата проверки	13:57:53 15 мая 2018г.
Модули поиска	Кольцо вузов; Модуль поиска "rgrTU"; Модуль поиска ЭБС "Юрайт"; Модуль поиска общеупотребительных выражений; Модуль поиска ЭБС "Лань"; Модуль поиска Интернет; Модуль поиска ЭБС "Айбукс"; Модуль поиска ЭБС "Университетская библиотека онлайн"; Цитирование; Модуль поиска ЭБС "BOOK.ru"; Модуль поиска ЭБС "Библиоросса"
Работу проверил	Моор Ирина Александровна
ФИО проверяющего	
Дата подписи	
	Подпись проверяющего

Чтобы убедиться в подлинности справки, используйте QR-код, который содержит ссылку на отчет.

Ответ на вопрос, является ли обнаруженное заимствование корректным, система оставляет на усмотрение проверяющего. Предоставленная информация не подлежит использованию в коммерческих целях.

Экспорт PDF

Adobe Acrobat Pro DC

Преобразуйте файлы PDF в формат Word или Excel через Интернет

Подробнее

Создать PDF

Редактировать PDF

Добавить комментарий

Объединить файлы

Заполнить и подписать

Дополнительные инструменты

Храните файлы и обменивайтесь ими в Document Cloud

Подробнее

РУС 7:44 13.06.2018

ПРИЛОЖЕНИЕ 8

Пример структуры и оформления содержания выпускной квалификационной работы Пример структуры и оформления содержания выпускной квалификационной работы

ВВЕДЕНИЕ .....**Ошибка! Закладка не определена.**

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РАЙОНЕ РАБОТ .....**Ошибка! Закладка не определена.**

2. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ РАЙОНА И УЧАСТКА РАБОТ**Ошибка! Закладка не определена.**

2.1. Геологическая позиция и общая геологическая характеристика района работ**Ошибка! Закладка не определена.**

2.2. Стратиграфия .....**Ошибка! Закладка не определена.**

2.3. Магматизм .....**Ошибка! Закладка не определена.**

2.4. Тектоника.....**Ошибка! Закладка не определена.**

2.5. Метаморфизм .....**Ошибка! Закладка не определена.**

2.6. Полезные ископаемые .....**Ошибка! Закладка не определена.**

2.7. Гидрогеологическая характеристика района работ**Ошибка! Закладка не определена.**

2.8. Геологическое обоснование выбора участка работ и геологическое строение участка работ **Ошибка! Закладка не определена.**

3. ФИЗИКО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ДЛЯ ПОСТАНОВКИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ РАБОТ .....**Ошибка! Закладка не определена.**

3.1. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых района работ**Ошибка! Закладка не определена.**

4. АНАЛИЗ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ГЕОФИЗИЧЕСКИХ РАБОТ, РАНЕЕ ПРОВЕДЕННЫХ НА УЧАСТКЕ .....**Ошибка! Закладка не определена.**

5. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ РАБОТ, ПРОВЕДЕННЫХ НА УЧАСТКЕ В СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ С. БРОДОКАЛМАК.....**Ошибка! Закладка не определена.**

6. МЕТОДИКА ПРОЕКТИРУЕМЫХ РАБОТ. АППАРАТУРА**Ошибка! Закладка не определена.**

6.1. Выбор и обоснование комплекса методов электроразведки**Ошибка! Закладка не определена.**

6.2. Аппаратура для проведения работ методом ВЭЗ**Ошибка! Закладка не определена.**

6.3. Аппаратура для проведения работ методом срединного градиента**Ошибка! Закладка не определена.**

6.4. Методика и техника работ .....**Ошибка! Закладка не определена.**

6.5. Камеральная обработка и интерпретация результатов работ**Ошибка! Закладка не определена.**

7. ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ**Ошибка! Закладка не определена.**

7.1. Мероприятия по охране труда и безопасному ведению работ**Ошибка! Закладка не определена.**

7.2. Мероприятия по охране окружающей среды...**Ошибка! Закладка не определена.**

8. ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ЧАСТЬ ПРОЕКТА.....**Ошибка! Закладка не определена.**

8.1. Сводный перечень проектируемых работ .....**Ошибка! Закладка не определена.**

8.2. Сводная смета.....**Ошибка! Закладка не определена.**

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....**Ошибка! Закладка не определена.**
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....**Ошибка! Закладка не определена.**

ПРИЛОЖЕНИЕ 9

Примеры библиографических описаний, применяемых при оформлении списка использованных источников

1. Об основополагающих принципах и правах в сфере труда и механизм её реализации [Текст]: Декларация МОТ от 18.06.1998 // МБТ.1998.

2. Конституция Российской Федерации [Электронный ресурс]: Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс». - Режим доступа: http://www.consultant.ru.

3. Трудовой кодекс Российской Федерации [Электронный ресурс]: Федеральный закон от 30.12.2001 г. № 197-ФЗ (в ред. от 05.10.2015) – Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс». - Режим доступа: http://www.consultant.ru.

4. О безопасности [Электронный ресурс]: Федеральный закон от 28.12.2010 г. № 390-ФЗ – Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс». - Режим доступа: http://www.consultant.ru.

5. Об общих принципах организации законодательных (представительных) и исполнительных органов власти субъектов Российской Федерации [Текст]: Федеральный закон от 06.10.1999 г. № 184-ФЗ // Собрание законодательства РФ. - 1999. - № 43.

6. О концепции национальной безопасности Российской Федерации [Текст]: Указ Президента Российской Федерации от 10 января 2000 г. № 24 // Собрание законодательства РФ. - 2000. - № 2.- Ст.170.

7. О порядке разработки и утверждения административных регламентов исполнения государственных функций (предоставления государственных услуг) [Электронный ресурс]: Постановление Правительства РФ от 11.11.2005 г. № 679. - Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс». – Режим доступа: http://www.consultant.ru.

8. Булаевский, Б.А. Правовое положение несовершеннолетних по российскому гражданскому законодательству [Текст]: Автореф. дисс. … к.ю.н. М., 1998.

9. Гаврилов, Э. О наименовании юридического лица [Текст] / Э.О. Гаврилов // Хозяйство и право. - 2011. - № 12. - С. 3 – 11.

10. Мачульская, Е.Е. Право социального обеспечения [Текст]: учебник для бакалавров / Е.Е. Мачульская. – М.: Изд-во Юрайт, 2012. – 575 с.

11. Черткова, Е.Л. Утопия как способ постижения социальной действительности [Электронный ресурс] / Е.Л. Черткова // Социемы: журнал Уральского гос. ун-та. – 2002. - № 8. – Режим доступа: http://2www/usu.ru/philosoph/chertkova.

12. Цивилистические записки: [Текст]: Межвузовский сборник научных трудов. Выпуск 2. – М.: «Статут» - Екатеринбург: Институт частного права, 2002. – 511 с.

13. Юридический советник [Электронный ресурс]. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM): зв., цв.; 12 см. – Прил.: Справочник пользователя [Текст]/ сост. В.А. Быков. – 32 с.

14. Временные методические рекомендации по вопросам реструктуризации бюджетной сферы и повышения эффективности расходов региональных и местных бюджетов (Краткая концепция реструктуризации государственного и муниципального сектора и повышения эффективности бюджетных расходов на региональном и местном уровнях) [Текст]. - М.: ИЭПП, 2006. - 67 с.

15. Свердловская область в 1992-1996 годах [Текст]: Стат. сб./ Свердл. обл. комитет гос. статистики Госкомстата РФ. – Екатеринбург, 1997. – 115 с.

16. Социальное положение и уровень жизни населения России в 2010 г. [Текст]: Стат. сб. / Росстат. – М., 2011. – 320 с.

17. Социально-экономическое положение федеральных округов в 2010 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа http://www.gks. Ru.

18. An Interview with Douglass C. North [Text] // The Newsletter of The Cliometric Society. - 1993. - Vol. 8. - N 3. - P. 23–28.

19. Burkhead, J. The Budget and Democratic Government [Text] / Lyden F.J., Miller E.G. (Eds.) / Planning, Programming, Budgeting. Markham: Chicago, 1972. 218 p.
20. Miller, D. Strategy Making and Structure: Analysis and Implications for Performance [Text] // Academy of Management Journal. - 1987. - Vol. 30. - N 1. - P. 45–51.
21. Министерство финансов Российской Федерации: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.minfin.ru.
22. Российская книжная палата: [Электронный ресурс]. - Режим доступа: http://www.bookchamber.ru.
23. Инструкция по делопроизводству в ООО «СК-групп» [Текст]. - Екатеринбург, 2012. – 26 с.
24. Бухгалтерский отчет ЗАО «ФНК» за 2012 год [Текст]. - Екатеринбург, 2013. – 14 с.
25. Правила внутреннего трудового распорядка АО «Маяк» [Текст]. - Екатеринбург, 2010. – 22 с.

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ И РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКИХ РАБОТ

ЭЛЕКРОТЕХНИЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Специальность

21.05.03 Технология геологической разведки

Екатеринбург

СОДЕРЖАНИЕ

Часть 1. ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ 5
1.1. Цель преподавателя дисциплины 5
1.2. Задачи изучения дисциплины 5
1.3. Перечень дисциплин с указанием разделов (тем), усвоение которых необходимо для изучения данной дисциплины 5
1.4. Содержание дисциплины 6

Часть 2. ДИЭЛЕКТРИКИ 12
2.1. Основные сведения о пробое диэлектриков 12
2.2. Пробой газообразных диэлектриков 13
2.3. Пробой твердых диэлектриков 18
2.4. Практическая работа № 1. Определение электрической прочности твердых и газообразных диэлектриков. Цель работы 21
2.5. Объект исследования 21
2.6. Средства измерения 21
2.7. Рабочее задание 21
2.8. Методические указания по выполнению рабочего задания 22
2.9. Контрольные вопросы 27

Часть 3. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ 28
3.1. Основные характеристики магнитных веществ 28
3.2. Физическая природа магнетизма 29
3.3 Классификация веществ по магнитным свойствам 32
3.4. Строение ферромагнетиков 33
3.5. Явления магнитной анизотропии и магнитострикции 36
3.6. Намагничивание ферромагнетика 38
3.7. Свойства ферромагнитных материалов в квазипостоянных магнитных полях 41
3.8. Дифференциальная магнитная проницаемость 44
3.9. Свойства ферромагнетиков в переменных магнитных полях 46
3.10. Индукционный метод определения параметров магнитных материалов с использованием осциллографа 53

3.11. Объект исследования 58
3.12. Средства измерения и вспомогательные средства исследования 59
3.13. Подготовка осциллографа к работе 59
3.14. Калибровка осциллографа и определение масштабов по напряженности и индукции магнитного поля 60
3.15. Подготовка звукового генератора к работе 61
3.16. Практическая работа №1. «Исследование свойств магнитных материалов в магнитных полях постоянной частоты». Цель работы 62
3.17. Рабочее задание 62
3.18. Методические рекомендации к выполнению рабочего задания 63
3.19. Содержание отчета 66
3.20. Вопросы для самоконтроля 67
3.21. Практическая работа №2. «Исследование свойств магнитных материалов в магнитных полях переменной частоты». Цель работы 67
3.22. Рабочее задание 68
3.23. Методические указания к выполнению рабочего задания 68
3.24. Содержание отчета 70
3.25. Вопросы для самоконтроля 70

Часть 4. РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКАЯ РАБОТА № 1. «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ИЗОЛЯЦИИ ДВУХЖИЛЬНОГО КАБЕЛЯ» 72
4.1. Требование к оформлению контрольной работы 72
4.2. Задание на контрольную работу 72
4.3. Методические указания к выполнению контрольной работы 74
4.4. Экзаменационные вопросы 78
Учебно-методические материалы 80

Часть 1
ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

1.1. Цель преподавателя дисциплины

В дисциплине «Электротехническое и конструкционное материаловедение» излагается широкий круг вопросов, связанных со свойствами различных материалов по отношению к электрическому и магнитному полям. Излагаются свойства разновидностей электротехнических материалов, применяемых в технике.

Целью преподавания дисциплины является изложение основных сведений о процессах, происходящих в электротехнических материалах под воздействием электрического и магнитного полей, ознакомление с основными характеристиками и параметрами, посредством которых оцениваются свойства материалов к этим полям, методами их практического определения, ознакомление с основными видами электротехнических материалов, областями и способами их применения.

Дисциплина «Электротехническое и конструкционное материаловедение» является одним из основных предметов, необходимых для последующего успешного освоения специальных дисциплин, изучаемых студентами направления подготовки бакалавров «Электроэнергетика и электротехника».

1.2. Задачи изучения дисциплины

В результате изучения дисциплины «Электротехническое и конструкционное материаловедение» студенты должны иметь ясное представление о процессах, происходящих в электротехнических материалах при воздействии на них электрического и магнитных полей, знать основные характеристики и параметры материалов, научится определять их экспериментально, усвоить требования, которым должны удовлетворять материалы при использовании в устройствах, предназначенных для работы в условиях горной промышленности, уметь производить выбор конкретных видов электротехнических материалов.

1.3. Перечень дисциплин с указанием разделов (тем), усвоение которых необходимо для изучения данной дисциплины

Успешное усвоение дисциплины «Электротехническое и конструкционное материаловедение» базируется на знаниях, полученных студентами при изучении физики (разделы: физика твёрдого тела, электричество, магнетизм),

химии, теоретических основ электротехники (разделы: электрические цепи постоянного и переменного тока, магнитные цепи), электрических измерений (разделы: основы метрологии, методы измерения электрических величин).

1.4. Содержание дисциплины

1.4.1. Введение

Краткий исторический обзор развития производства и использования электротехнических материалов. Значение электротехнических материалов в развитии и совершенствовании современного электромашиностроения.

Роль русских и советских учёных в создании и совершенствовании современных электротехнических материалов.

Предмет дисциплины «Электротехническое и конструкционное материаловедение». Классификация электротехнических материалов.

Вопросы для самопроверки

1. Какое значение имеют электротехнические материалы в развитии электромашиностроения?
2. Перечислите основные классы электротехнических материалов по свойствам, которыми обладают по отношению к электромагнитному полю.
3. Каковы перспективы развития производства электротехнических материалов?

1.4.2. Диэлектрики

Понятие о диэлектриках. Поляризация диэлектриков и основные виды поляризации.

Классификация диэлектриков. Понятие о диэлектрической проницаемости, абсолютная и относительная диэлектрические проницаемости. Зависимость величины диэлектрической проницаемости от внешних факторов.

Понятие о электропроводности диэлектриков. Удельные объёмное и поверхностное сопротивления и методика их определения.

Диэлектрические потери. Угол диэлектрических потерь. Схемы замещения диэлектриков для учёта диэлектрических потерь. Виды диэлектрических потерь.

Понятие о электрическом пробое диэлектриков. Пробивное напряжение и электрическая прочность. Пробой газообразных диэлектриков. Виды пробоев жидких и твёрдых диэлектриков.

Физико-механические свойства диэлектриков. Основные механические свойства диэлектриков. Нагревостойкость. Классы нагревостойкости. Температура воспламенения и температура вспышки. Морозостойкость и

тропикостойкость. Гигроскопичность и влагопроницаемость. Химические и радиационные свойства.

Вопросы для самопроверки

1. Какие вещества называются диэлектриками?
2. По каким признакам классифицируются диэлектрики?
3. Какой процесс называется поляризацией диэлектриков?
4. Как происходит электронная поляризация?
5. Как зависит диэлектрическая проницаемость от температуры и частоты электрического поля при электронной поляризации?
6. Как происходит ионная поляризация, и в каких веществах она наблюдается?
7. Как происходит дипольная поляризация?
8. Как зависит величина диэлектрической проницаемости от температуры и частоты электрического поля?
9. Как происходит ионно-релаксационная, электронно-релаксационная и миграционная (структурная) поляризации?
10. Как осуществляется спонтанная поляризация и для каких диэлектриков она характерна?
11. На какие группы подразделяются диэлектрики в соответствии с видами поляризации, которыми они обладают?
12. Как зависит диэлектрическая проницаемость газообразных диэлектриков от давления и температуры, величины напряжённости и частоты внешнего электрического поля?
13. Как зависит диэлектрическая проницаемость жидких диэлектриков от температуры, величины напряженности и частоты электрического поля?
14. Как зависит диэлектрическая проницаемость твёрдых диэлектриков от температуры, величины напряженности и частоты электрического поля?
15. Как определяется диэлектрическая проницаемость сложных диэлектриков?
16. Назовите причины возникновения электрического тока в диэлектрике под воздействием внешнего электрического поля.
17. Что такое объёмное и поверхностное удельные сопротивления и как они определяются?
18. Как зависит электропроводность газообразных диэлектриков от напряжения и почему?
19. Чем обуславливается электропроводность твёрдых диэлектриков и как она зависит от температуры и напряжённости электрического поля?
20. Чем обуславливается электропроводность жидких диэлектриков, как она зависит от температуры и напряжённости электрического поля?
21. Какие потери называются диэлектрическими?
22. Какой угол называется углом диэлектрических потерь?

23. Нарисуйте схемы замещения диэлектрика и соответствующие им векторные диаграммы для учёта величины диэлектрических потерь.
24. Установите связь между параметрами параллельной и последовательной схем замещения диэлектрика с потерями.
25. Какие виды диэлектрических потерь существуют в диэлектриках?
26. Какое явление называется электрическим пробоем диэлектриков?
27. Каким образом происходит пробой газообразных диэлектриков?
28. От каких факторов зависит электрическая прочность газообразных диэлектриков?
29. Объясните, как осуществляется электрический пробой жидких диэлектриков с высокой степенью очистки?
30. Как осуществляется электрический пробой технически чистых диэлектриков?
31. Назовите виды пробоев твёрдых диэлектриков.
32. Как происходит электрический, электротепловой и электрохимический пробой?
33. Что такое гигроскопичность диэлектрика и как она влияет на его электрические свойства?
34. Перечислите основные механические свойства диэлектриков.
35. Назовите основные параметры, с помощью которых характеризуются тепловые свойства диэлектриков.
36. Перечислите классы нагревостойкости диэлектриков и дайте краткую характеристику каждого из них.

1.4.3. Изоляционные материалы

Газообразные изоляционные материалы. Сравнительные характеристики основных газообразных изоляционных материалов и области их применения.

Жидкие изоляционные материалы. Нефтяные масла. Трансформаторное масло, его основные харктеристики и свойства, старение и регенерация, методы испытаний и области применения.

Синтетические жидкие диэлектрики, сравнительные характеристики и области применения. Компаунды.

Полимерные изоляционные материалы. Волокнистые изоляционные материалы и слоистые пластики.

Слюда и материалы на основе слюды. Керамика и стекло.

Вопросы для самопроверки

1. Какие из газообразных изоляционных материалов нашли наибольшее практическое применение?
2. Произведите сравнительный анализ свойств газообразных изоляционных материалов.
3. В чём заключается старение трансформаторного масла и как оно восстанавливается?

4. Какими параметрами характеризуется трансформаторное масло как электроизоляционный материал?
5. Перечислите основные синтетические жидкие диэлектрики, используемые на практике, их основные свойства и области применения.
6. Какие органические высокомолекулярные изоляционные материалы, используемые на практике, вам известны?
7. Какими свойствами обладают компаунды и основные области их применения?

1.4.4. Магнитные материалы

Природа магнетизма. Условия возникновения ферромагнитных свойств у веществ. Классификация веществ по магнитным свойствам.

Строение ферромагнетиков. Явление магнитной анизотропии и магнитострикции. Использование этих явлений в технике.

Основные характеристики магнитных материалов. Петля гистерезиса и основная кривая намагничивания. Остаточная индукция и коэрцитивная сила, индукция технического насыщения.

Относительная и абсолютная магнитные проницаемости. Потери на гистерезис и вихревые токи при перемагничивании в переменных магнитных полях. Явление вытеснения магнитного поля и его последствия.

Магнитомягкие, магнитотвёрдые материалы и магнитные материалы специального назначения.

Разновидности магнитных материалов. Листовые электротехнические стали и пермаллой, основные характеристики и применение.

Вопросы для самопроверки

1. Какие элементарные круговые точки существуют в атоме?
2. Какой круговой ток создаёт наибольший магнитный момент в атоме?
3. Чем объяснить то, что не у всех химических элементов атомы обладают собственным магнитным моментом?
4. Как называются области в ферромагнетиках, в пределах которых магнитные моменты атомов ориентированы параллельно?
5. Как происходит намагничивание ферромагнетиков?
6. Какое явление в ферромагнетиках называется магнитной анизотропией?
7. Где и как учитывается явление магнитной анизотропии?
8. В чём заключается явление магнитострикции и где оно используется?
9. Чем отличается основная кривая намагниченности от петли гистерезиса?
10. Назовите основные характеристики ферромагнитных материалов.

11. Как зависит величина магнитной проницаемости от напряжённости магнитного поля?
12. Как зависит магнитная проницаемость от частоты переменного магнитного поля?
13. Как расшифровать обозначения марок электротехнических сталей?
14. Назовите основные характеристики листовых электротехнических сталей и области их применения.
15. Что представляют собой сплавы пермаллои?
16. В чём преимущество холоднокатаных сталей перед горячекатаными?
17. Какие основные виды магнитотвёрдых материалов используется на практике?
18. Какие материалы специального назначения используются на практике?
19. Что представляют собой ферриты и в чём их преимущество перед другими видами магнитных материалов?

1.4.5. Полупроводники

Понятие о полупроводниках. Классификация полупроводников. Понятия о видах электропроводности полупроводников.

Вопросы для самопроверки

1. Какие вещества называются полупроводниками?
2. Какие виды электропроводности свойственны собственным полупроводникам?
3. Как получить полупроводник с основной электронной электропроводностью?
4. Как получить полупроводник с основной дырочной электропроводностью?
5. Как зависит удельная электропроводность полупроводников от температуры?
6. Как влияет механическая деформация на электропроводность полупроводника?
7. Как зависит электропроводность полупроводников от частоты и интенсивности световой энергии?
8. Как влияет напряжённость электрического поля на электропроводность полупроводника?

1.4.6. Проводники

Понятие о проводниках природа электропроводности проводников. Основные характеристики. Классификация проводниковых материалов. Понятие о сверхпроводимости проводников.

Вопросы для самопроверки

1. Какой механизм электропроводности свойственен металлам?
2. Какой механизм электропроводности свойственен электролитам?
3. В чём разница в объяснении механизма электропроводности с позиций классической электронной теории строения металлов и кантовой механики?

4. Какими параметрами характеризуются свойства проводников?
5. Чем объяснить зависимость удельной электропроводности металлов от температуры?
6. Почему удельное сопротивление металла зависит от его деформации?
7. Какие материалы относятся к материалам высокой проводимости?
8. Дайте сравнительную характеристику меди и алюминия.
9. Какие сплавы высокого сопротивления применяются в технике?
10. Что такое явление сверхпроводимости?
11. Каким материалам и при каких условиях свойственно явление сверхпроводимости?

1.4.7. Примерный перечень лабораторных работ

1. Определение электрической прочности газообразных и твёрдых диэлектриков.
2. Определение динамических характеристик ферромагнетиков при постоянной частоте магнитного поля.
3. Определение динамических характеристик ферромагнетиков при изменяющейся частоте магнитного поля.

Часть 2
ДИЭЛЕКТРИКИ

2.1. Основные сведения о пробое диэлектриков

Важнейшей областью использования диэлектриков в технических целях является применение их в качестве изоляционных материалов, предназначающихся для предотвращения протекания электрического тока по путям, не предусмотренным электрической схемой установки. Такое использование диэлектриков связано с их исключительно малой электропроводностью.

Так, удельная объемная электропроводность этих материалов при комнатной температуре не превышает 10^{-8} см/м, а удельное объемное сопротивление соответственно больше 10^{8} Ом·м.

Такое значение электропроводности и удельного объемного сопротивления сохраняется только для определенного напряжения. Превышение этого напряжения приводит к резкому (скачкообразному) возрастанию электропроводности и уменьшению сопротивления диэлектрика.

Потеря диэлектриком изоляционных свойств под воздействием внешнего электрического поля называется ***пробоем***.

Напряжение, при котором в диэлектрике возникает электрический пробой, называется ***пробивным*** или ***напряжением пробоя***.

Пробивное напряжение обозначается $U_{\text{пр}}$. Единицей измерения пробивного напряжения в системе СИ является вольт (В). Допускается использовать в качестве единицы измерения пробивного напряжения киловольт (кВ).

Значение пробивного напряжения зависит от химического состава, структуры строения, толщины диэлектрика и воздействия ряда других факторов.

Другой важнейшей характеристикой способности диэлектриков выдерживать воздействие высоких напряжений без потери изоляционных свойств является электрическая прочность ($E_{\text{пр}}$). Под электрической прочностью понимается отношение пробивного напряжения диэлектрика к его толщине:

$$E_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр}}}{h},$$

где h – толщина диэлектрика.

Единицей измерения электрической прочности в системе СИ является В/м. В связи с тем, что использование этой единицы на практике неудобно из-за малой толщины изоляции в различных электромеханических установках и больших значений пробивных напряжений, ГОСТом допускается применение

внесистемной единицы измерения, равной кВ/мм. Соотношение между этими единицами – кВ/мм = 10^6 В/м.

Если на диэлектрик воздействует внешнее однородное электрическое поле, то электрическая прочность представляет собой напряженность этого поля, при которой происходит пробой.

В зависимости от механизма развития и причин возникновения различают следующие виды пробоев: электрический, тепловой и электрохимический.

Электрический пробой связан с развитием процессов ударной и фотонной ионизации, возникающих в сильных электрических полях и приводящих к быстрому росту концентрации свободных носителей электрических зарядов к скачкообразному увеличению электрического тока в месте пробоя при превышении значения напряженности электрического поля, равного электрической прочности диэлектрика.

Тепловой пробой возникает под воздействием тепловой энергии, выделяющейся в диэлектриках за счет диэлектрических потерь или поступающей от посторонних источников тепловой энергии. Тепловая энергия вызывает уменьшение активного сопротивления диэлектриков и возрастание активного потока, приводящих к дальнейшему увеличению температуры диэлектриков с последующим их термическим разрушением.

Электрохимический пробой возникает при длительной эксплуатации диэлектриков в электрических полях и связан с изменением химического состава в результате протекающих в диэлектриках электрохимических процессов.

Более подробно каждый из видов пробоя диэлектриков рассмотрен в последующих параграфах.

2.2. Пробой газообразных диэлектриков

В газообразных диэлектриках пробой является электрическим и связан с развитием процессов ударной и фотонной ионизации под воздействием сильных электрических полей.

В любом газообразном диэлектрике содержится малое количество положительных и отрицательных ионов и электронов, находящихся в хаотическом тепловом движении. Под воздействием электрического поля эти частицы начинают перемещаться либо в направлении напряженности поля (положительные ионы), либо в направлении, противоположном ей (электроны, отрицательные ионы).

При этом каждая из частиц получает добавочную энергию за счет электрического поля

$$W_{ч} = g \cdot U_{\lambda}, \qquad (2.1)$$

где g – электрический заряд напряженной частицы; U_λ – разность потенциалов на длине свободного пробега заряженной частицы.

В однородном электрическом поле

$$U_\lambda = E \cdot \lambda, \tag{2.2}$$

где E – напряженность однородного электрического поля; λ – длина свободного пробега частицы.

Таким образом, в однородном электрическом поле добавочная энергия, приобретенная частицей в результате воздействия электрического поля:

$$W_ч = g \cdot E \cdot \lambda. \tag{2.3}$$

В конце пути свободного пробега заряженная частица сталкивается с нейтральной молекулой. Если при этом энергия заряженной частицы оказывается больше энергии ионизации нейтральной молекулы газообразного диэлектрика, то последняя расщепляется на электрон и положительно заряженный ион. Этот процесс получил название процесса ударной ионизации.

Таким образом, условие возникновения ударной ионизации описывается уравнением

$$W_ч \geq W_и. \tag{2.4}$$

С учетом уравнений (2.2) и (2.3) получим:

$$E_н \cdot g \cdot \lambda \geq W_и,$$

а

$$U_\lambda = E_н \cdot \lambda \geq W_и, \tag{2.5}$$

где U_λ – ионизационный потенциал газообразного диэлектрика; $E_н$ – начальная напряженность поля.

Ионизационный потенциал характеризует энергию ионизации диэлектрика. У различных газообразных диэлектриков он лежит в диапазоне от 4 до 25 В, что соответствует энергии ионизации от 4 до 25 эВ.

Так как λ и g для каждого из газообразных диэлектриков постоянны, то ударная ионизация начинается при определенной напряженности поля, называемой начальной напряженностью.

В ряде случаев столкновение заряженной частицы с нейтральной молекулой может не ионизировать последнюю, а принести ее в возбужденное состояние. Через определенный промежуток времени возбужденная молекула испускает фотон, отдавая при этом избыточную энергию. Фотон поглощается другой нейтральной молекулой, которая в этом случае ионизируется, расщепляясь на электрон и положительно заряженный ион. Такая ионизация называется фотонной. Фотонная ионизация приводит к быстрому развитию канала пробоя в газообразном промежутке.

Развитие процессов ударной и фотонной ионизации при напряженности электрического поля большей, чем начальная, приводит к резкому возрастанию количества свободных носителей электрических зарядов и возникновению двух встречных источников разноименно заряженных частиц в канале пробоя.

В результате пробоя пространство, занимаемое каналом пробоя, заполнено движущимися заряженными частицами газа. Такое состояние газообразного диэлектрика получило название газоразрядной плазмы.

За счет фотонной ионизации пробой газов осуществляется практически мгновенно.

Электрическая прочность газообразного диэлектрика зависит от длительности воздействия электрического поля. При кратковременном воздействии напряжение пробоя диэлектрика, выше чем при длительном воздействии. Повышение пробивного напряжения характеризуется коэффициентом импульса

$$\beta = \frac{U_{\text{пр}}}{U_{\text{пр50}}}, \qquad (2.6)$$

где $U_{\text{пр}}$ – пробивное напряжение при данной длительности импульса; $U_{\text{пр50}}$ – пробивное напряжение при постоянном или переменном напряжении частотой 50 Гц.

Значения коэффициента импульса находятся в диапазоне от 1 до 1,5.

Электрическая прочность газообразных диэлектриков зависит от расстояния между электродами или толщины диэлектрика. Зависимость $E_{\text{пр}}=f(h)$ представлена на рисунке 2.1.

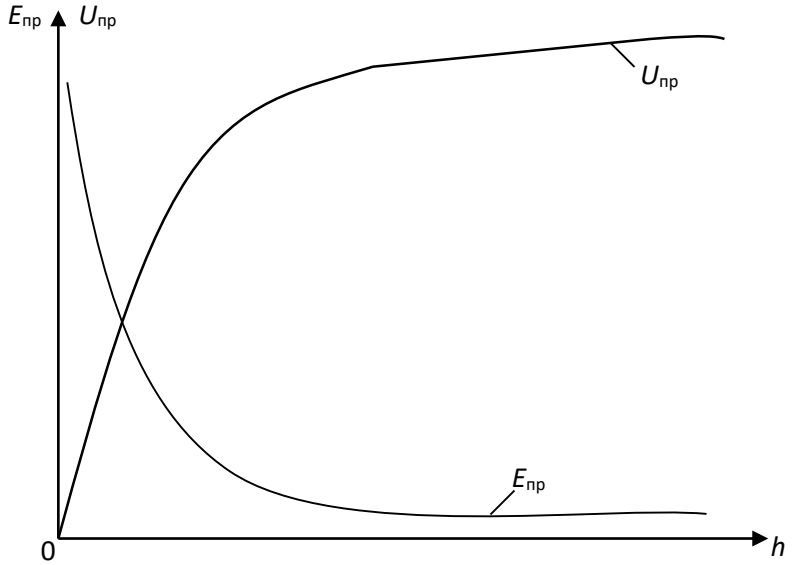


Рис. 2.1. Зависимость электрической прочности и пробивного напряжения газообразного диэлектрика от расстояния между электродами

Из рис. 2.1 видно, что с ростом толщины диэлектрика его электрическая прочность уменьшается, а пробивное напряжение увеличивается. Это объясняется тем, что при малых расстояниях между электродами затрудняется возникновение процесса ударной ионизации. Это видно из анализа уравнения (2.5).

Решив уравнение (2.5) относительно $E_н$, получим

$$E_н = \frac{W_и}{g \cdot \lambda}.$$

При малых расстояниях между электродами, когда $h \geq \lambda$, можно записать

$$E_н = \frac{W_и}{g \cdot h}. \qquad (2.7)$$

Из уравнения (2.7) видим, что чем меньше толщина газообразного диэлектрика, тем больше начальная напряженность электрического поля, при которой энергия движущийся заряженной частицы обеспечивает ионизацию молекулы газообразного диэлектрика и возникновение процессов ударной и фотонной ионизации.

Электрическая прочность газообразного диэлектрика зависит также и от давления газа. Эта зависимость представлена на рисунке 2.2.

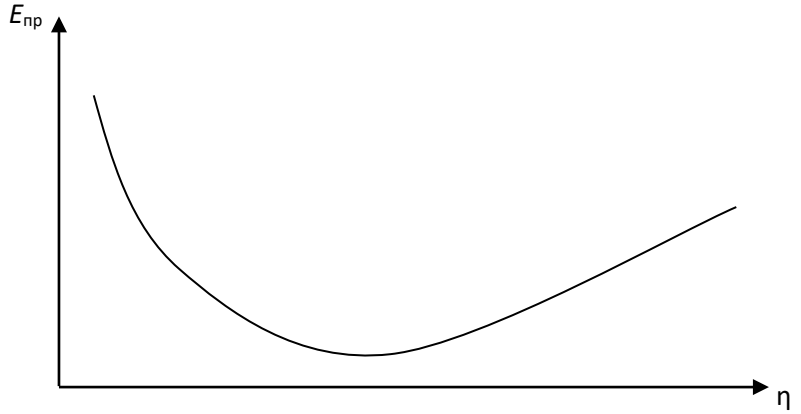


Рис. 2.2. Зависимость электрической прочности газа от давления

Как видно из рис. 2.2, при малых значениях давления наблюдается уменьшение электрической прочности с ростом давления. Такое явление объясняется тем, что при малых давлениях вероятность столкновения заряженной частицы с нейтральной молекулой незначительная, и затрудняется развитие процессов ударной и фотонной ионизации. С ростом давления плотность молекул газа увеличивается, что приводит к возрастанию вероятности столкновений заряженных частиц с молекулами газа и облегчает развитие процессов ударной ионизации. При сверхвысоких давлениях существенно уменьшается длина свободного пробега заряженной частицы, что, согласно уравнению (2.7), приводит к росту начальной напряженности поля.

Электрическая прочность газообразного диэлектрика существенно зависит от однородности электрического поля (рис. 2.3).

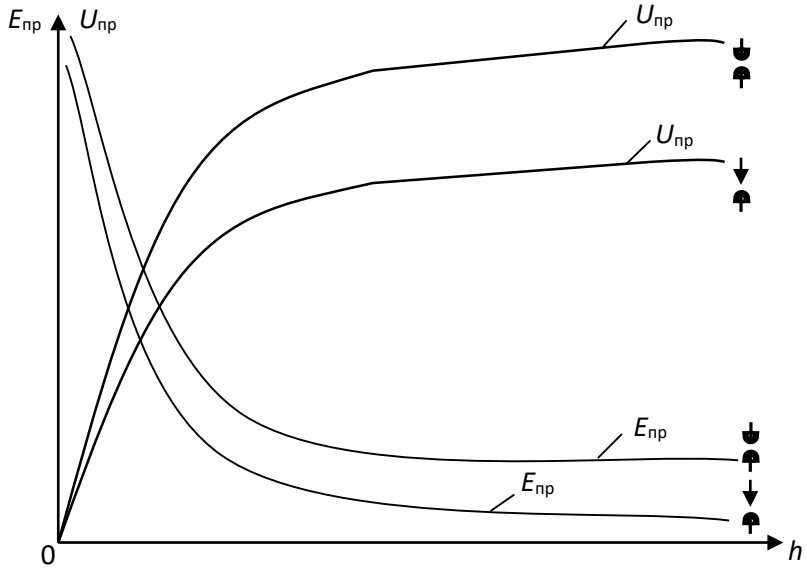


Рис. 2.3. Зависимости электрической прочности и пробивного напряжения газообразного диэлектрика от расстояния между электродами в однородном и неоднородном электрических полях

В однородных электрических полях, возникающих между плоскими электродами с закругленными краями, либо между сферическими электродами большого диаметра, электрическая прочность значительно выше, чем в неоднородных электрических полях между электродами типа «игла – игла», «полусфера – игла», « плоскость – игла» и т. п. Неоднородное электрическое поле возникает также между двумя полусферами, когда расстояние между ними больше радиуса сферы.

Меньшее значение электрической прочности газообразных диэлектриков в неоднородных электрических полях по сравнению с электрической прочностью в однородных полях объясняется тем, что при одной и той же разности потенциалов между электродами напряженность поля в точках, расположенных по кратчайшему расстоянию между двумя электродами, в неоднородных полях значительно выше, чем напряженность однородного электрического поля. Следовательно и электрический пробой газообразного диэлектрика в неоднородном электрическом поле произойдет при меньшем напряжении, приложенном к электродам, чем в однородном поле.

По разному развивается электрический пробой в однородных и неоднородных электрических полях.

В однородном электрическом поле при определенном значении напряжения, зависящем от температуры, давления газа и расстояния между

электродами возникает искровой разряд, переходящий в дуговой при дальнейшем росте напряжения.

В неоднородных электрических полях вначале возникает частичный разряд в местах, где напряженность достигает максимальных значений (коронный разряд). При дальнейшем возрастании напряжения коронный разряд переходит в искровой, а затем и в дуговой разряды.

Электрическая прочность газообразного диэлектрика зависит от полярности электродов типа «игла – плоскость», «игла – сфера».

При положительной полярности иглы пробой происходит при меньшем напряжении, чем при обратной полярности. Это явление объясняется тем, что ионизация газа начинается в районе кончика иглы, независимо от ее полярности, так как именно в этой области напряженность поля максимальная. При положительной полярности иглы у ее кончика возникает положительный объемный заряд из положительно заряженных ионов газа, который как бы является продолжением иглы, способствуя уменьшению длины газообразного промежутка и соответствующему уменьшению пробивного напряжения.

При отрицательной полярности иглы образовавшийся объемный положительный заряд как бы экранизирует иглу, препятствуя перемещению электронов от иглы к поверхности положительно заряженной плоскости или сферы. Наличие экрана из положительно заряженных ионов около кончика иглы и приводит к возрастанию пробивного напряжения при отрицательной полярности иглы, по сравнению с пробивным напряжением при обратной полярности иглы.

2.3. Пробой твердых диэлектриков

В твердых диэлектриках могут возникать четыре вида пробоев:

- электрический пробой макроскопически однородных твердых диэлектриков;
- электрический пробой макроскопически неоднородных твердых диэлектриков;
- электротепловой (тепловой) пробой;
- электрохимический пробой.

Электрический пробой макроскопически однородных твердых диэлектриков развивается аналогично электрическому пробою в газообразных диэлектриках в результате осуществления процесса ударной ионизации, когда исключено влияние электропроводности и диэлектрических потерь, обуславливающих разогрев диэлектрика.

В связи с этим, зависимости электрической прочности и пробивного напряжения твердых диэлектриков от толщины и конфигураций электродов

анологичны таким же зависимостям для газообразных диэлектриков (рис. 2.1, рис. 2.3).

Электрический пробой неоднородных диэлектриков характерен для технических диэлектриков, в структуре которых имеются поры и капилляры, заполненные газообразным диэлектриком. Чаще всего таким газообразным диэлектриком является воздух. Так как электрическая прочность воздуха значительно меньше электрической прочности твердых диэлектриков, то наличие капилляров и пор в структуре твердых диэлектриков обуславливает значительную меньшую электрическую прочность неоднородных диэлектриков сравнению с однородными.

С ростом толщины неоднородного твердого диэлектрика наблюдается уменьшение его электрической прочности, так как возрастает количество газовых включений.

Электрическая прочность неоднородных твердых диэлектриков зависит от однородности и неоднородности электрического поля. Но, в отличие от газообразных и однородных твердых диэлектриков, электрическая прочность неоднородных твердых диэлектриков может быть в неоднородном поле больше, чем в однородном. Это связано с тем, что при большей площади электродов, между которыми создается однородное поле, возрастает количество слабых мест (пор, капилляров, трещин и т. д.), приводящих к снижению электрической прочности твердого диэлектрика.

Электротепловой (тепловой) пробой связан с разогревом материала в электрическом поле за счет возрастания сквозной электропроводности и диэлектрических потерь, приводящих к потере изоляционных свойств материала. Пробивное напряжение при электротепловом пробое зависит от частоты поля, условий охлаждения, температуры окружающей среды и т. п.

Установившийся температурный режим возникает тогда, когда выделение тепла в изоляционном материале равняется теплоотдаче в окружающую среду. Этот режим описывается следующим уравнением

$$U^2 \cdot \omega \cdot c \cdot \mathrm{tg}\delta = \sigma \cdot S\left(t_{\text{раб}} - t_{\text{о}}\right), \qquad (2.8)$$

где U – напряжение на электродах; ω – угловая частота; c – емкость изоляционного материала; $\mathrm{tg}\delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь изоляционного материала σ – коэффициент теплоотдачи; S – поверхность изоляционного материала; $t_{\text{раб}}$ – температура изоляционного материала; $t_{\text{о}}$ – температура окружающей среды.

На рисунке 2.4 построены зависимости мощности диэлектрических потерь P_a и мощности теплоотдачи P_t от температуры.

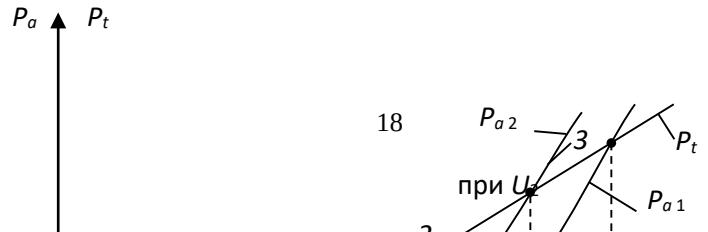


Рис. 2.4. Зависимость мощности диэлектрических потерь и мощности теплоотдачи изоляционного материала от температуры

Как видно из рис. 2.4, зависимость $P_{a1}=f(t)$ имеет две точки пересечения с прямой $P_t = f(t)$ и следовательно, два установившихся режима при $t_{1раб}$ и $t_{1кр}$. Учитывая, что в условиях эксплуатации не исключается дополнительный разогрев изоляционного материала за счет посторонних источников тепловой энергии, рабочая температура может случайно возрасти. Если с учетом возможного возрастания $t_{1раб}<t_{1кр}$, то тепловой пробой не произойдет, так как количество тепла, выделяемое внутри диэлектрика, возрастает медленнее, чем увеличивается теплоотдача. Если за счет дополнительного нагрева установится соотношение $t_{1раб}>t_{1кр}$, то количество тепловой энергии, выделяемой в изоляционном материале, превысит теплоотдачу, и температура будет расти до полного разрушения диэлектрика. С ростом напряжения зависимость $P_a=f(t)$ смещается вверх (см. кривую *3*, полученную при $U_2>U_1$). При тех же самых условиях охлаждения повышение напряжения приводит к росту рабочей температуры ($t_{2раб}>t_{1раб}$) и уменьшению критической температуры ($t_{1кр}>t_{2кр}$).

Таким образом, как видно из рис. 2.4, увеличение напряжения приводит к возрастанию рабочей температуры за счет роста количества тепла, выделяемого в материале.

Выделение тепловой энергии вследствие диэлектрических потерь приводит к увеличению электрической прочности диэлектрика. На рисунке 2.5 приведены зависимости электрической прочности и пробивного напряжения твердого диэлектрика от толщины при электрическом и электротепловом пробоях.

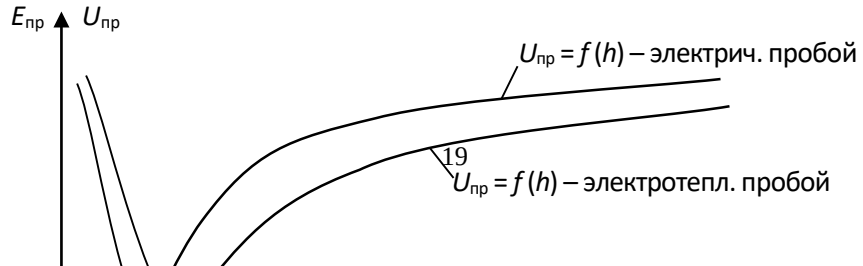


Рис. 2.5. Зависимости электрической прочности и пробивного напряжения от толщины диэлектрика

Как видно из рис. 2.5, электрическая прочность изоляционного материала при электротепловом пробое меньше, чем при чисто электрическом пробое.

Уменьшение электрической прочности при электротепловом пробое связано с одной стороны с разрушением структуры строения изоляционного материала (растрескивание, обугливание и т. д.), когда рабочая температура превышает критическую. С другой стороны, электрическая прочность при электротепловом пробое меньше, чем при электрическом даже в том случае, когда рабочая температура не превышает критическую. Такое явление можно объяснить следующим образом: с ростом температуры изоляционного материала увеличивается кинетическая энергия теплового хаотического движения заряженных частиц и нейтральных молекул твердого диэлектрика. Возрастание энергии теплового хаотического движения молекул приводит к тому, что полю необходимо сообщить меньшую дополнительную энергию движущихся заряженных частиц, чтобы последняя могла ионизировать нейтральную молекулу при столкновении с ней. И, следовательно, выполнение условия развития ударной ионизации наступает при меньшем напряжении, подаваемом на электроды.

2.4. Лабораторная работа № 1. Определение электрической прочности твердых и газообразных диэлектриков. Цель работы

Целью лабораторной работы является научить студентов определять электрическую прочность твердых и газообразных диэлектриков и выявлять зависимости электрической прочности от толщины диэлектрика и конфигурации электродов, формирование навыков использования теоретических сведений к объяснению результатов эксперимента.

2.5. Объект исследования

1. Образцы твердых диэлектриков. Материал, размеры образцов и их толщины задаются преподавателем.
2. Воздух. Длины воздушных зазоров задаются преподавателем.

2.6. Средства измерения

1. Испытательная высоковольтная установка с максимальным напряжением до 10 кВ. Принципиальная электрическая схема установки приведена на рис. 2.6.
2. Вольтметр переменного тока с пределом измерения до 150 В.
3. Микрометр типа МК с пределом измерения 0 – 25 мм. Цена деления микрометра – 0,1 мм.
4. Штангенциркуль. Цена деления – 0,1 мм.

2.7. Рабочее задание

1. Испытать на электрический пробой образцы твердого диэлектрика различной толщины, определяя пробивное напряжение каждого из них. Число образцов и измерений определяет преподаватель.
2. Рассчитать электрическую прочность каждого образца.
3. Произвести электротепловой пробой аналогичных по химическому составу и толщине образцов твердого диэлектрика, определяя пробивное напряжение каждого образца. Количество образцов и измерений такое же, как и при испытании на электрический пробой.
4. Рассчитать электрическую прочность каждого образца при электротепловом пробое.
5. Построить для одних и тех же образцов:
   - зависимости $U_{пр}=f(h)$ при электрическом и электротепловом пробоях в одних осях координат;
   - зависимости $E_{пр}=f(h)$ при электрическом и электротепловом пробоях в одних осях координат.
6. Осуществить электрический пробой воздуха при различных толщинах воздушного зазора h, определяя каждый раз значение пробивного напряжения. Электрический пробой произвести для двух сочетаний электродов с различной конфигурацией, заданных преподавателем.

7. Рассчитать электрическую прочность воздуха для каждого пробоя.
8. Построить:
   - зависимости $U_{пр}=f(h)$ для каждого из сочетаний электродов в одних осях координат;
   - зависимости $E_{пр}=f(h)$ для каждого из сочетаний электродов в одних осях координат.
9. Сделать выводы по работе.

2.8. Методические указания по выполнению рабочего задания

2.8.1. Устройство и принцип действия лабораторной установки

Принципиальная электрическая схема лабораторной установки для определения пробивного напряжения и электрической прочности твердых и газообразных диэлектриков приведена на рис. 2.6.

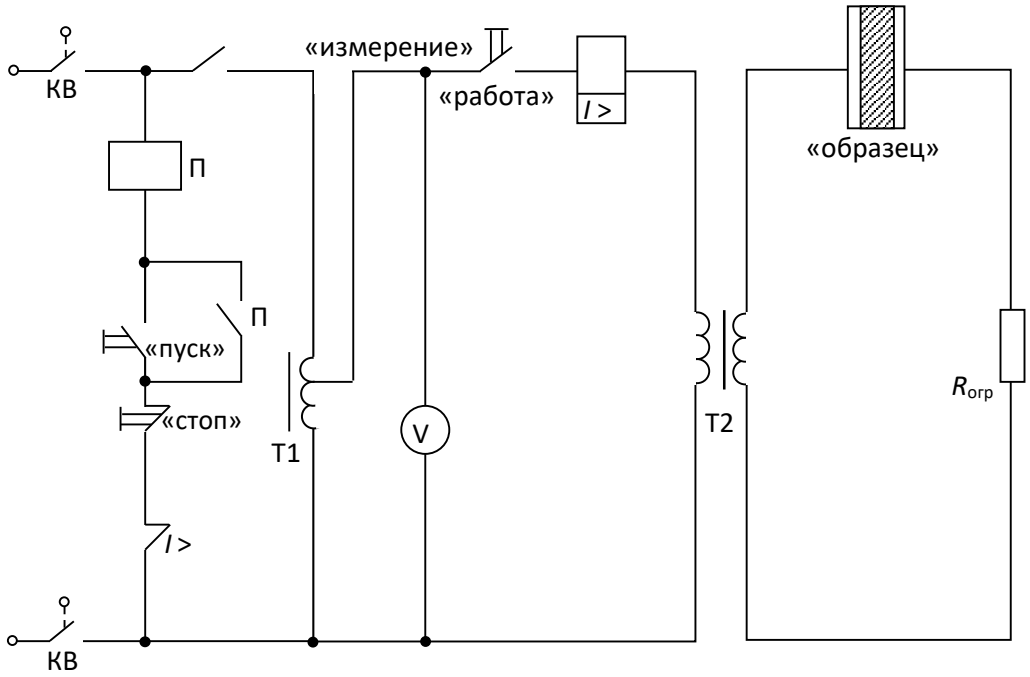


Рис. 2.6. Принципиальная электрическая схема установки

В состав установки входят:

– линейный автотрансформатор Т1, предназначенный для регулирования напряжения, подаваемого на испытательный образец;

– высоковольтный трансформатор Т2 с максимальным напряжением вторичной обмотки U_{2max}=10 кВ и коэффициентом K=10;

– сопротивление $R_{огр}$, предназначенное для ограничения тока в обмотке высокого напряжения при возникновении пробоя образца;

– электромагнитный пускатель: кнопки «пуск» и «стоп»;

– сигнальная лампа «напряжение подано»;

– переключатель режима работы установки «работа – измерение»;

– многопредельный вольтметр.

В нижней части лабораторной установки находится высоковольтный трансформатор и токоограничивающее сопротивление. Эта часть установки закрыта металлическим заземленным экраном, исключающим возможность попадания работающего на установке под высокое напряжение.

На верхней, горизонтально расположенной части установки находятся линейный автотрансформатор, вольтметр, переключатель режима работы и высоковольтная камера со сменными электродами.

Принцип действия лабораторной установки заключается в следующем. При закрытой дверце высоковольтной камеры контакты концевых выключателей КВ замкнуты и электрическая цепь установки подготовлена к работе.

При нажатии кнопки «пуск», расположенной в левом верхнем углу стенда, срабатывает электромагнитный пускатель П и через его замкнутые контакты напряжение подается на автотрансформатор Т1. Одновременно в камере высокого напряжения загорается сигнальная лампа «напряжение подано». Вторая пара контактов пускателя блокирует кнопку «пуск». Напряжение с выхода автотрансформатора поступает на обмотку низкого напряжения высоковольтного трансформатора, если переключатель режима работы установлен в положении «работа». Это напряжение измеряется многопредельным вольтметром переменного тока. На обмотке высокого напряжения трансформатора создается напряжение, значение которого может быть вычислено по формуле

$$U_2 = K \cdot U_1 . \qquad (2.9)$$

Когда напряжение U_2 достигает значения, равного напряжению пробоя $U_{\text{пр}}$, происходит пробой образца, и в цепи вторичной обмотки возрастает ток, амплитуда которого ограничивается сопротивлением $R_{\text{огр}}$. Возрастание тока вторичной обмотки вызывает соответствующее увеличение тока первичной обмотки трансформатора, в результате которого срабатывает реле максимального тока $I >$. Контакты этого реле размыкаются, разрывая цепь питания обмотки электромагнитного пускателя. Контакты пускателя размыкаются и отключают стенд от сети.

Обычно пробой образца происходит внезапно, что затрудняет отсчет по вольтметру напряжения, при котором произошел пробой. Поэтому для облегчения отсчета напряжения пробоя предусмотрена возможность работы установки в режиме «измерение». Для перевода установки в этот режим переключатель режима работы устанавливается в положение «измерение». В

этом режиме высоковольтный трансформатор отключается от выхода автотрансформатора. Если положение рукояти автотрансформатора, регулирующей его выходное напряжение, сохранить таким же, как и в момент пробоя, то после нажатия на кнопку «пуск» вольтметр покажет то же напряжение, что было установлено при пробое.

2.8.2. Методика экспериментального определения пробивного напряжения и электрической прочности твердых диэлектриков при электрическом пробое

1. Перед началом эксперимента необходимо проверить правильность подключения элементов установки (рис. 2.7), предварительно установив рукоятку автотрансформатора в нулевое положение и открыв дверку камеры высокого напряжения. Лампа «напряжение подано» не должна гореть.

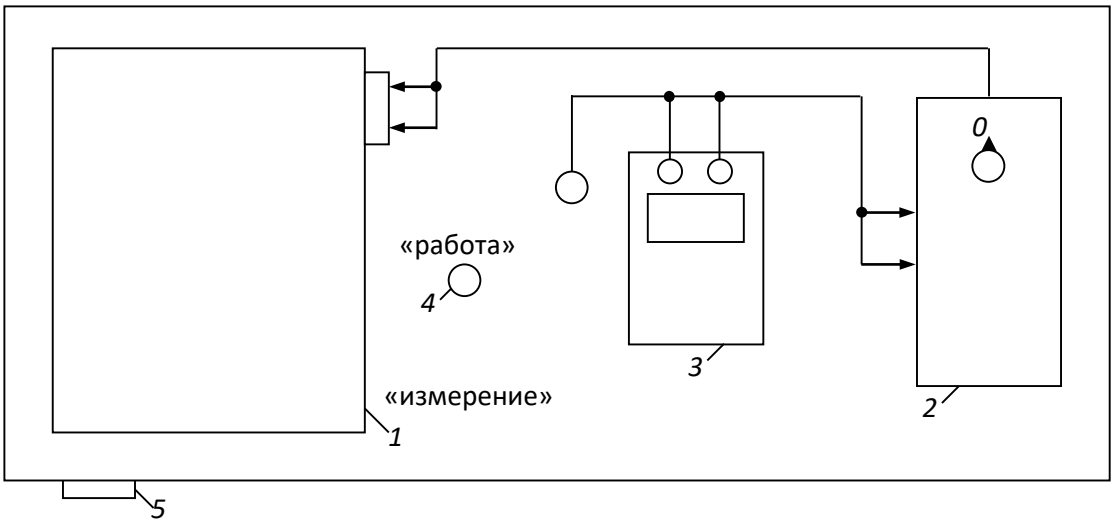


Рис. 7. Схема соединения элементов лабораторной установки:
1 – высоковольтная камера; 2 – линейный автотрансформатор; 3 – вольтметр; 4 – переключатель режима работы установки; 5 – кнопки «пуск» и «стоп»

2. Установить по указанию преподавателя сменные электроды.

3. Измерить микрометром толщину испытываемого образца диэлектрика. Рекомендуется начинать эксперимент с образца наибольшей величины. Данные измерений записать в таблицу 2.1.

Таблица 2.1

Экспериментальное определение напряжение пробоя и электрической прочности твердых диэлектриков при электрическом пробое

№ п/п	h, мм	U_1, В	$U_{пр}$, кВ	$E_{пр}$, кВ/мм	Конфигурация электродов

Примечание: высота столбцов таблицы должна быть рассчитана для записи результатов пробоя 7 – 8 образцов.

4. Разместить образец между электродами в высоковольтной камере. Для этого необходимо отвернуть стопорный винт верхнего электрода до тех пор, пока последний не начнет свободно перемещаться. Поднять верхний электрод и поместить образец в образовавшийся зазор. Опустить верхний электрод на образец и повернуть стопорный винт в обратном направлении до упора.

5. Закрыть крышку камеры высокого напряжения.

6. Установить переключатель режима работы в положение «работа».

7. Нажать кнопку «пуск». При этом загорается лампа «напряжение подано».

8. Плавно вращая рукоятку автотрансформатора, увеличивать напряжение, подаваемое на образец, до тех пор, пока не произойдет автоматическое отключение напряжения, свидетельствующее о пробое образца. Сигнальная лампа «напряжение подано» должна погаснуть.

9. Переключатель режима работы установить в положение «измерение».

10. Нажать на кнопку «пуск». Сигнальная лампа «напряжение подано» должна загореться.

11. По вольтметру отсчитать напряжение U_1, при котором произошел пробой диэлектрика и записать в табл. 2.1.

12. Нажать кнопку «стоп». Сигнальная лампа «напряжение подано» должна погаснуть.

13. Установить рукоятку линейного автотрансформатора в нулевое положение, открыть дверцу камеры высокого напряжения и убрать пробитый образец.

14. Рассчитать пробивное напряжение и электрическую прочность образца по формуле

$$U_{пр} = \frac{K \cdot U_1}{1000}; \qquad (2.10)$$

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{h}, \qquad (2.11)$$

где U_1 – действующее значение выходного напряжения автотрансформатора, В; $U_{пр}$ – действующее значение напряжения пробоя образца, кВ; K=100 – коэффициент трансформации высоковольтного трансформатора; $E_{пр}$ – электрическая прочность образца, кВ/мм.

Рассчитанные значения $U_{пр}$ и $E_{пр}$ записать в таблицу 2.1.

2.8.3. Методика экспериментального определения электрической прочности твердых диэлектриков при электротепловом пробое

1. Электротепловой пробой производится на образцах диэлектриков, аналогичных по химическому составу и геометрическим размерам образцам, использованным при электрическом пробое. Количество испытываемых образцов и их толщины задаются преподавателем.

2. Перед началом испытаний необходимо рассчитать значения начального напряжения $U_{нач}$ и интервал, через который будет изменяться напряжение установки ΔU по следующим формулам:

$$U_{нач} = 0{,}6 \cdot U_{пр} \cdot 1000; \quad (2.12)$$

$$\Delta U = 1000 \cdot U_{пр} \cdot \frac{(1-0{,}6)}{6 \div 7} = \frac{0{,}4}{6 \div 7} \cdot U_{пр} \cdot 1000, \quad (2.13)$$

где $U_{пр}$ – пробивное напряжение образца, полученное при электрическом пробое, кВ; ΔU – интервал, через который изменяется напряжение, приложенное к образцу при электротепловом пробое, В.

3. Выполнить пункты 3 – 7 из 2.8.2. данных методических указаний.

4. Плавно вращая рукоятку автотрансформатора, установить напряжение, подаваемое на образец, равным ___.

5. Выдержать образец под действием напряжения $U_{нач}$ и в течение интервала времени, указанного преподавателем.

6. Вращая рукоятку автотрансформатора увеличить напряжение на образец на ΔU.

7. Выдержать образец под действием напряжения в течение указанного преподавателем интервала времени.

8. Повторить операции, перечисленные в пунктах 6 и 7, до тех пор пока не произойдет пробой образца.

9. Измерить пробивное напряжение в соответствии с пунктами 9 – 13 из методики 2.8.2.

10. Рассчитать пробивное напряжение и электрическую прочность образца при электротепловом пробое по формулам (2.10) и (2.11). Данные измерений и расчётов записываются в таблицу 2.2. Пример заполнения таблицы приведен ниже.

Таблица 2.2

Экспериментальное определение напряжение пробоя и электрической прочности твердых диэлектриков при электротепловом пробое

№ п/п	h, мм	$U_{нач}$, В	ΔU, В	U_1, В	$U_{пр}$, кВ	$E_{пр}$, кВ/мм	Конфигурация электродов

11. Построить зависимости $U_{пр}=f(h)$ при электротепловом и электрическом пробоях в одних осях координат.

12. Построить зависимости $E_{пр}=f(h)$ при электротепловом и электрическом пробоях твердого диэлектрика в одних осях координат.

2.8.4. Методика экспериментального определения электрической прочности воздуха

1. Установить электроды заданной преподавателем конфигурации в высоковольтной камере стенда.

2. Установить необходимую толщину воздушного зазора между электродами. Для этого отвернуть стопорный винт верхнего электрода и разместить калиброванные пластины между электродами. Опустить верхний электрод на поверхность пластин и зафиксировать его положение с помощью стопорного винта. Убрать калиброванные пластины из камеры.

3. Осуществить электрический пробой воздуха в соответствии с пунктами 5 – 14 из 2.8.2. данных методических указаний. Электрический пробой воздуха произвести для двух сочетаний электродов различной формы в соответствии с указаниями преподавателя.

4. Построить зависимости $U_{пр}=f(h)$ для обоих сочетаний электродов в одних осях координат.

5. Построить зависимости $E_{пр}=f(h)$ для обоих сочетаний электродов в одних осях координат.

2.9. Контрольные вопросы

1. С помощью каких показателей характеризуется способность диэлектрика противостоять электрическому пробою?
2. Какая из величин (пробивное напряжение или электрическая прочность) более точно оценивает способность различных диэлектриков противостоять электрическому пробою?
3. Чем объяснить, что электрическая прочность пористых твердых диэлектриков ниже прочности однородных по структуре строения твердых диэлектриков?
4. Какими процессами обуславливается развитие электрического пробоя в газообразных диэлектриках?
5. В чем разница между электротепловым и чисто электрическим пробоем диэлектриков?
6. Какое явление называется пробоем диэлектриков?
7. В каком из электрических полей (однородном или неоднородном) электрическая прочность диэлектриков выше? Чем это можно объяснить?
8. По каким причинам электрическая прочность диэлектриков при тепловом пробое меньше, чем при электрическом?
9. Зависит ли электрическая прочность воздуха от полярности электродов при следующих сочетаниях электродов: игла – плоскость, игла – полусфера? Ответ аргументируйте.
10. Чем объяснить, что электрическая прочность воздуха при сочетании электродов игла плоскость или игла полусфера уменьшается в большем диапазоне, чем его прочность при сочетании электродов плоскость –

плоскость, полусфера – полусфера, с ростом толщины воздушного зазора?

11. Чем объяснить, что электрическая прочность диэлектриков уменьшается с ростом толщины?
12. При каких условиях в твердых диэлектриках может произойти электротепловой пробой?
13. Почему необходимо учитывать процесс старения электрической изоляции при определении рабочего напряжения различных электрических машин?
14. Как изменяется электрическая прочность газообразных диэлектриков с ростом давления и почему?
15. Влияет ли температура на электрическую прочность диэлектриков? Ответ аргументируйте.

Часть 3
МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

3.1. Основные характеристики магнитных веществ

Магнитное состояние вещества оценивается намагниченностью. Намагниченностью называется сумма элементарных магнитных моментов в единице объема вещества

$$M = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i}{V}, \qquad (3.1)$$

где m_i – элементарный магнитный момент (спин электрона); V – объем образца.

Значение намагниченности зависит от напряженности магнитного поля H и связано с последней в соответствии с уравнением:

$$M = \chi \cdot H$$

где χ – магнитная восприимчивость вещества.

В системе СИ магнитная восприимчивость является безразмерной величиной.

Под воздействием напряженности магнитного поля в веществе создается магнитная индукция, зависимость которой от напряженности поля и намагниченности материала описывается уравнением

$$B = \mu_0 (H + \chi \cdot H), \qquad (3.2)$$

где μ_0=1,256·10^{-6} – магнитная постоянная вакуума, Гн/м.

В системе СИ индукция измеряется в теслах (Тл), а в ситстеме СГС – в гауссах (ГС).

Связь между индукцией и напряженностью магнитного поля может быть также описана следующим уравнением:

$$B = \mu_a \cdot H = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H, \qquad (3.3)$$

где μ_a – абсолютная магнитная проницаемость; μ_r – относительная магнитная проницаемость.

Абсолютная магнитная проницаемость имеет ту же размеренность, что и магнитная постоянная вакуума, а относительная магнитная проницаемость является безразмерной величиной.

Абсолютная и относительная магнитная проницаемости связаны между собой соотношением

$$\mu_a = \mu_0 \cdot \mu_r. \qquad (3.4)$$

Если учесть, что

$$\mu_a = \frac{B}{H},$$

а (3.5)

$$\mu_r = \frac{B}{H \cdot \mu_0},$$

становится ясным физический смысл относительной магнитной проницаемости. Она показывает, во сколько раз магнитная индукция в веществе больше, чем индукция в вакууме под воздействием намагничивающих полей одинаковой напряженности.

3.2. Физическая природа магнетизма

Известно, что элементарный замкнутый круговой электрический ток *i* создает магнитное поле, основной характеристикой которого является магнитный элемент

$$\underline{m} = i \cdot \underline{S},$$

где $\underline{S}$ – векторная величина площади, охватываемой током.

На уровне атома можно условно выделить три основные формы движения электрических зарядов, создающих элементарные магнитные моменты:

- движение электронов по круговой орбите вокруг ядра;
- вращение электронов вокруг собственной оси;
- вращение протонов ядра атома.

Наибольший магнитный момент создается за счет вращения электрона вокруг собственной оси. Этот магнитный момент получил название – спин электрона. Спины электронов могут принимать только вполне определенные дискретные значения, кратные постоянной Планка. Минимальное значение спина электрона превышает магнитный момент, создаваемый протоном, примерно в 650 раз.

Но не все электроны, создающие электронные оболочки атома, участвуют в создании магнитного момента атома. Рассмотрим, как создается результирующий магнитный момент атома вещества. Электроны в атомах вещества занимают различные энергетические уровни, которые принято изображать в виде ряда электронных оболочек. Количество оболочек в атоме химического элемента определяется номером периода таблицы Менделеева, в котором расположен данный элемент. Каждая из электронных оболочек состоит из ряда подоболочек, число которых колеблется от 1 до 4. Номер электронной оболочки индексируется цифрами от 1 до 7, а номер подоболочки буквами *S, p, d, f*. Пример обозначения оболочек и подоболочек приведен на рис. 3.1.

В подоболочках с индексом *S* могут находиться максимально 2, в подоболочках *p* – 6, в подоболочках *d* – 10 и в подоболочках *f* – 14 электронов.

Заполнение электронами оболочек и подоболочек у подавляющего большинства элементов подчиняются следующему правилу.

Прежде всего заполняются наиболее близко расположенные к ядру атома оболочки и подоболочки. Заполнение последующих электронных подоболочек начинается после того, как полностью заполнена предыдущая.

В полностью заполненных подоболочках половина количества электронов, заполнивших электронную подоболочку, вращаются в одном направлении, создавая спиновые моменты, направление которых условно принимается за *положительное*.

Другая половина электронов данной подоболочки вращается в противоположном направлении, создавая спиновые моменты, направление которых принимается за *отрицательное*.

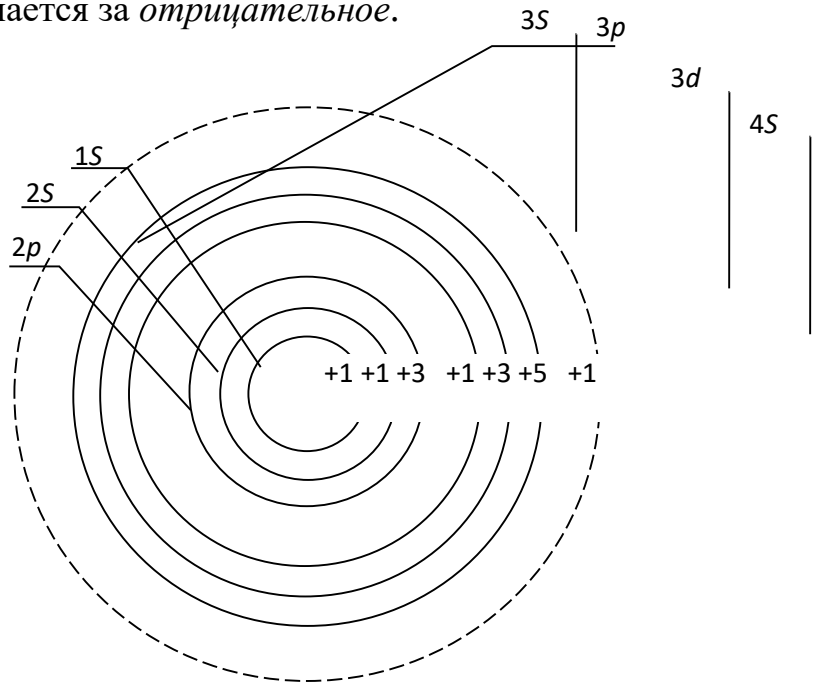


Рис. 3.1. Распределение электронов по оболочкам и подоболочкам в атоме железа

Так как количество положительных и отрицательных спинов в полностью заполненной электронной подоболочке одинаково, то они взаимокомпенсируются.

Следовательно, атомы элементов, электронные оболочки и подоболочки которых полностью заполнены электронами, не имеют собственных магнитных моментов, а сами вещества слабо намагничиваются в магнитном поле.

Но у ряда химических элементов такой порядок заполнения электронами оболочек и подоболочек нарушается.

Как видно из рис. 3.1, у атома железа не заполнена полностью подоболочка 3*d*, на которой находится всего 6 электронов вместо 10, а уже заполнена следующая, валентная для железа, подоболочка 4*S*.

Пять из шести электронов подоболочки 3*d* вращаются в одном направлении, создавая положительные спины электронов. Шестой электрон вращается в направлении обратном, создавая противоположно направленный спин – отрицательный.

Таким образом в подоболочке 3*d* атома железа существует 4 нескомпенсированных спинов электронов, которые, суммируясь, вызывают появление магнитного момента у атома.

Наличие нескомпенсированных спинов электронов в различных подоболочках наблюдается и у атомов ряда других элементов: кобальта, никеля, марганца и др.

Электроны, находящиеся в наружной валентной подоболочке, служить источником магнитных моментов не могут, т. к. при образовании молекул и кристаллов их магнитные моменты компенсируются спинами валентных электронов соседних атомов.

Учитывая вышеизложенное, можно сформулировать первое условие возникновения ферромагнетизма у веществ.

Для того чтобы вещество хорошо намагничивалось и в нем создавалась большая магнитная индукция, необходимо, чтобы у атомов этого вещества существовали нескомпенсированные спины электронов в подоболочках, предшествующих валентной.

Однако выполнения только одного этого условия недостаточно для того, чтобы вещество являлось ферромагнетиком. Связано это с тем, что в любом объеме вещества, с которым приходится иметь дело на практике, содержится большое количество атомов. Электроны атомов образуют многоэлектронный коллектив.

Между атомами происходит постоянный обмен электронами. При обмене между электронами соседних атомов возникает сильное электростатическое взаимодействие. Данное взаимодействие получило название «обменного», а энергия этого взаимодействия называется «обменной энергией».

Такое электростатическое взаимодействие электронов соседних атомов способно ориентировать нескомпенсированные спины электронов определенным образом. Направление ориентации спинов электронов соседних атомов определяется значением обменной энергии.

График зависимости обменной энергии от отношения *K* приведен на рис. 3.2.

Известно, что обменная энергия зависит от отношения

$$k = \frac{a}{r},$$

где a – расстояние между центрами соседних атомов; r – радиус электронной подоболочки с некомпенсированными спинами электронов.

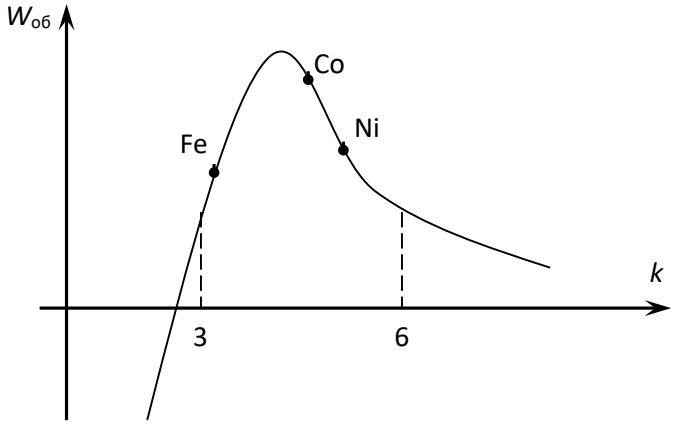


Рис. 2.2. Зависимость «обменной» энергии от геометрических размеров кристаллической решетки вещества

При $k > 3$ обменная энергия положительна, но настолько мала, что спины электронов соседних атомов ориентируются хаотично, вещества с такой ориентацией спинов намагничиваются слабо и относятся к классу парамагнетиков. С уменьшением k значение обменной энергии возрастает, что заставляет спиновые моменты соседних атомов ориентироваться параллельно друг другу. Это приводит к тому, что спиновые моменты атомов складываются и возникает самопроизвольное намагниченное состояние вещества. При $k = 3{,}5$ обменная энергия достигает максимума и при дальнейшем сближении атомов начинает убывать. Когда $k < 3$, обменная энергия становится отрицательной. При отрицательной обменной энергии энергетически выгодным становится взаимопротивоголожная ориентация спинов электронов соседних атомов, приводящая к их взаимной компенсации. Вещества с отрицательной обменной энергией называются антиферромагнетиками.

Таким образом, второе условие возникновения ферромагнетизма в веществе заключается в том, что оно должно обладать достаточно большей положительной обменной энергией, т. е. отношение k должно находиться в диапазоне $3 < k < 6$.

При выполнении обоих условий в веществе возникает внутреннее магнитное поле, характеризуемое намагниченностью M, определяемой в соответствии с уравнением (3.1).

3.3. Классификация веществ по магнитным свойствам

В 3.2. показано, что магнитные свойства веществ зависят от наличия или отсутствия нескомпенсированных спиновых моментов в электронных подоболочках атомов и от длины междуатомных расстояний между соседними атомами (отношение *k*).

По способности намагничиваться под воздействием магнитного поля все вещества подразделяются на следующие большие группы: диамагнетики, парамагнетики, магнетики.

Магнетики, в свою очередь, подразделяются на ферромагнетики, ферримагнетики и антиферромагнетики. Краткая характеристика каждой из групп материалов приведена в табл. 3.1.

Таблица 3.1.

Классификация веществ по магнитным свойствам

Группа	Ориентация спиновых электронов соседних атомов	Краткая характеристика свойств
Диамагнетики	нескопенсированные спины электронов, отсутствуют	при отсутствии намагничивающего поля (H=0), намагниченность M=0. При $H\neq0$ появляются индуктированные магнитные моменты и $M\neq0$. Отсюда $\chi=-10^{-6}$, а $\mu_r<1$. Магнитная проницаемость μ_r не зависит от напряженности поля
Парамагнетики	ориентация спиновых моментов соседних атомов хаотичная	при H=0, у атомов существуют собственные магнитные моменты m, но намагниченность M=0, из-за хаотической оринетации спиновых моментов, $10^{-6}<\chi<10^{-3}$. Магнитная проницаемость $\mu_r>1$, но не значительно и не зависит от напряженности магнитного поля

Продолжение табл. 3.1

Группа	Ориентация спиновых электронов соседних атомов	Краткая характеристика свойств
Ферромагнетики	ориентация спиновых моментов паралельная	при H=0, у атомов существуют собственные магнитные моменты m, возникают области с самопроизвольной намагниченностью ($M\neq0$). Но в целом намагниченность всего атома вещества равна 0. $X=10^5\ldots10^7$. Магнитная проницаемость $\mu_r>>1$ и ее значение зависит от напряженности магнитного поля
Ферримагнетики (ферриты)	антипаралельная ориентация магнитных моментов разного значения	материалы, получаемые спеканием оксидов железа, никеля, цинка, марганца и других металлов, являются

		нескомпенсированными антиферомагнетиками. При H=0 существуют области самопроизвольного намагничивания с $M \neq 0$. В целом вещество остается ненамагниченным. Магнитная проницаемость $\mu_r >> 1$ и зависит от напряженности поля
Антиферомагнетики	антипаралельная ориентация спиновых моментов соседних атомов	атомы имеют собственные магнитные моменты, одинаковые по значению и противоположно направленные. При H=0, намагниченность M=0, т. к. эти вещества обладают отрицательной обменной энергией. Легированием других веществ могут быть превращены в ферримагнетики.

Из таблицы видно, что наиболее высокими свойствами обладают ферромагнетики и ферримагнетики, в которых можно создавать значительно большие магнитные индукции, чем в других материалах, из-за наличия у них самопроизвольной намагниченности.

3.4. Строение ферромагнетиков

Все процессы намагничивания и перемагничивания обусловлены магнитным взаимодействием атомов. Это взаимодействие приводит к тому, что при отсутствии внешнего магнитного поля ферромагнитные тела разбиваются на области с самопроизвольным намагничиванием, называемые *доменами*.

Объем домена колеблется в пределах $10^{-1} \div 10^{-6}$ см^3. Каждый из доменов намагничен до насыщения в направлении, отличном от направления намагниченности соседних доменов. Насыщенное магнитное состояние домена оценивается намагниченностью насыщения M_S, которая определяется из следующего уравнения:

$$M_S = \lim_{V \to 0} \left(\sum_{i=1}^{n} \frac{m_i}{V} \right). \qquad (3.6)$$

Направление намагниченности каждого из доменов устанавливается таким, чтобы магнитные моменты их взаимокомпенсировались, и намагниченность ферромагнетика в целом равнялась нулю при отсутствии внешнего намагничивающего поля.

Рассмотрим подробнее, почему это происходит. Допустим, что ферромагнетик имеет однодоменную структуру, при которой магнитные моменты атомов ориентированы параллельно.

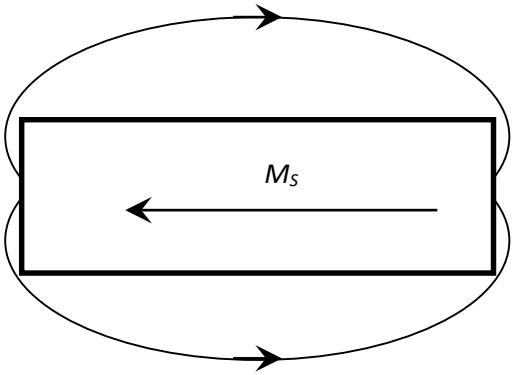


Рис. 3.3. Однодоменная структура строения ферромагнетика

При такой структуре строения (рис. 3.3.) силовые линии магнитного поля замыкаются через окружающее образец воздушное пространство, и, следовательно, в нем возникает размагничивающее поле напряженностью:

$$H_p = -N \cdot M_S, \qquad (3.7)$$

где N – коэффициент размагничивания, значение которого зависит от структуры строения, ферромагнетика (числа доменов).

В отсутствие внешнего магнитного поля свободная магнитостатическая энергия образца в собственном размагничивающем поле зависит от коэффициента размагничивания и может быть определена из уравнения

$$W_{\text{ст}} = -0{,}5N \cdot H_p \cdot M_S = 0{,}5N \cdot M_S^2. \qquad (3.8)$$

Так как коэффициент размагничивания имеет наибольшее значение при однодоменной структуре строения, то и свободная магнитостатическая энергия максимальна именно при такой структуре строения.

Известно, что при отсутствии внешних источников энергии вещество стремится приобрести такую структуру строения, при которой его собственная энергия была бы минимальна. С этой точки зрения однодоменная структура строения для ферромагнетика является энергетически невыгодной, так как в этом случае он обладает максимальной свободной магнитостатической энергией.

Стремясь уменьшить значение магнитостатической энергии, ферромагнетик начинает самопроизвольно делиться на области со спонтанным намагничиванием.

Энергетически более выгодными являются структуры с двумя и четырьмя доменами, рис. 3.4.

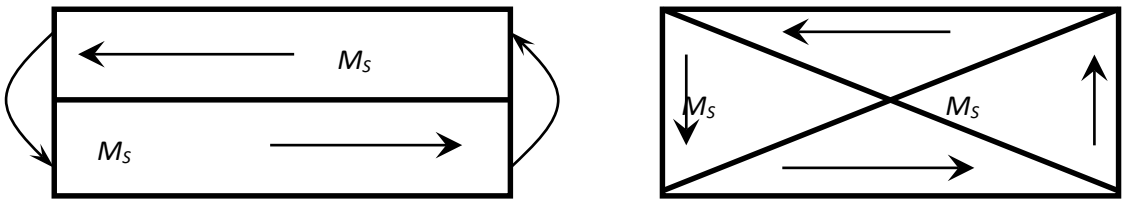


Рис. 3.4. Двухдоменная и четырехдоменная структура строения ферромагнетика

При двухдоменной структуре коэффициент размагничивания и, следовательно, свободная магнитостатическая энергия приблизительно в два раза меньше, чем при однодоменной.

Энергетически еще более выгодной является структура с четырьмя доменами. При самопроизвольном разбиении образца на 4 домена в каждом из них устанавливаются такие направления спонтанной намагниченности, при которых магнитный поток замыкается внутри образца и размагничивающее поле отсутствует, $H_p = 0$.

При переходе от домена к домену направление намагниченности изменяется плавно в пределах слоя, расположенного между соседними доменами. Этот слой получил название стенки, или границы (рис. 3.5).

В пределах границы происходит постепенный поворот спинов от одного направления намагниченности к другому. Толщина стенок соответствует определенному значению общей свободной энергии стенки, которая складывается из обменной энергии, магнитоупругой энергии и энергии магнитной анизотропии.

Спонтанное деление образца ферромагнетика на домены приводит к уменьшению свободной магнитостатической энергии образца. Но одновременно возрастает количество стенок между доменами, что приводит к увеличению свободной энергии, равной сумме свободных энергий всех стенок.

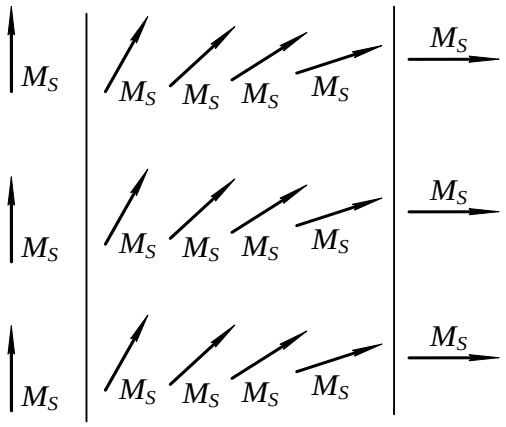


Рис. 3.5. Схема поворота спинов атома в пределах границы домена

Деление ферромагнетика на домены будет продолжаться до тех пор, пока затраты энергии на создание нового домена, равные свободной энергии стенки, не сравняются с уменьшением магнитостатической энергии. Дальнейшее деление ферромагнетика на домены становится энергетически невыгодным.

Доменная структура строения ферромагнетика сохраняется только до определенной температуры, называемой температурой Кюри, или точкой Кюри.

Точка Кюри соответствует равенству кинетической энергии теплового движения и обменной энергии. Поэтому у разных ферромагнетиков точка Кюри различна. Так, у железа она равна 770 °С, у никеля – 358 °С, у кобальта – 1127 °С.

При температуре выше, чем точка Кюри, кинетическая энергия теплового движения становится достаточной для преодоления ориентирующего действия обменной энергии, и состояние самопроизвольной намагниченности доменов нарушается. Ферромагнетик превращается в парамагнетик.

3.5. Явления магнитной анизотропии и магнитострикции

Практически все ферромагнетики состоят из большого числа кристаллов. Кристаллы различных материалов имеют разные пространственные кристаллические решетки, в узлах которых находятся атомы вещества. Так, кристалл железа представляет собой куб, в вершинах и в центре которого располагаются атомы железа (рис. 3.6, *а*).

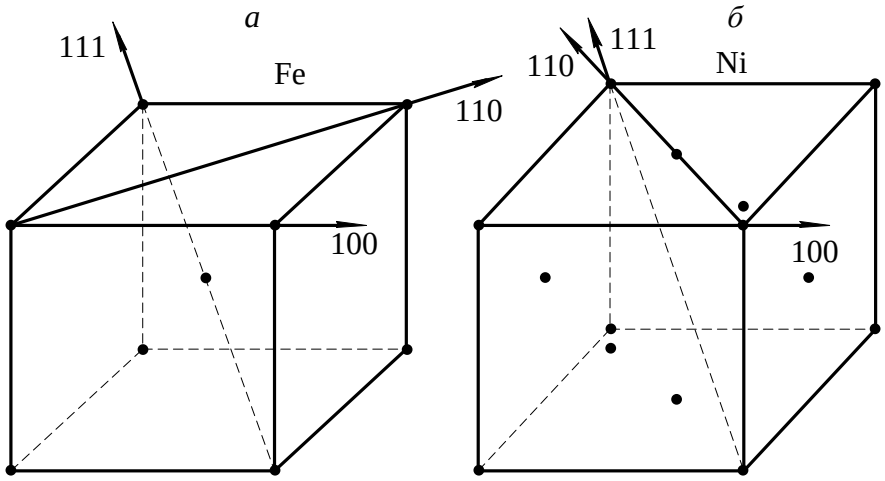


Рис. 3.6. Основные кристаллографические направления железа и никеля

В кристаллах железа различают три основные кристаллографических направления:

- 100 – направление по ребру куба;
- 110 – направление по диагонали грани куба;
- 111 – направление по диагонали грани самого куба.

Если ферромагнетик намагничивать по различным кристаллографическим направлениям, то состояние насыщения будет достигаться при разных значениях напряженности магнитного поля.

Состояние магнитного насыщения железа достигается при наименьшей напряженности намагничивающего поля, если намагничивание производится по направлению 100, т. е. по ребру куба. И наоборот, насыщение железа происходит

при максимальной напряженности намагничивающего поля, если намагничивание производится по кристаллографической оси 111.

Направление 100 называется *осью легкого намагничивания*, направление 111 – *осью трудного намагничивания*.

Если железо намагничивать по кристаллографическому направлению 110, то насыщение материала достигается при меньшей напряженности намагничивающего поля, чем при намагничивании по оси 111 и большей, чем при намагничивании по кристаллографическому направлению 100. Кристаллографическое направление 110 называется *осью среднего намагничивания*. Кривые намагничивания для разных направлений железа приведены на рисунке 3.7.

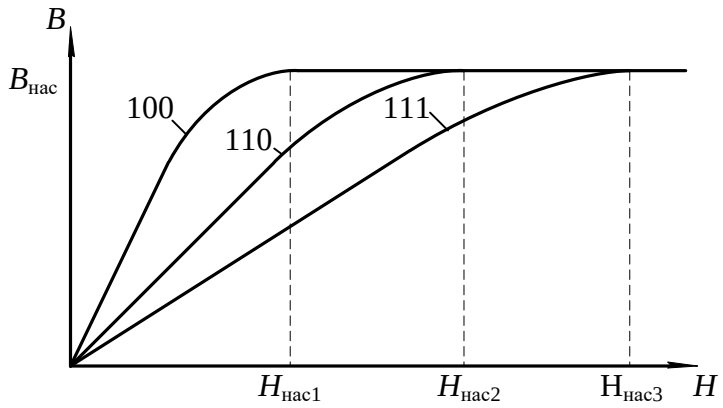


Рис. 3.7. Кривые намагничивания для разных направлений железа

В отличие от железа, у кристалла никеля атомы располагаются в вершинах и в центрах каждой грани куба. Такое расположение атомов в кристалле никеля приводит к изменению осей легкого и трудного намагничивания. У никеля осью легкого намагничивания является направление 111, а осью трудного намагничивания – кристаллографическое направление 100 (рис. 3.6, *б*). Направление среднего намагничивания у никеля остается таким же, что и у железа –110.

Различие магнитных свойств у ферромагнетиков при намагничивании по различным кристаллографическим направлениям называется *м а г н и т н о й а н и з о т р о п и е й* .

Явление магнитной анизотропии учитывается при изготовлении холоднокатаных анизотропных текстурованных электротехнических сталей. У таких сталей оси легкого намагничивания всех кристаллов совпадают с направлением прокатки. Применение анизотропных холоднокатаных сталей позволяет уменьшить вес электрических машин примерно на одну треть, по сравнению с электрическими машинами такой же мощности, в которых используется изотропная горячекатаная сталь.

Намагничивание ферромагнетиков сопровождается изменением линейных размеров образца за счет магнитного взаимодействия электронов, вызывающего изменение расстояний и деформацию кристаллической решетки. Это явление называется *магнитострикцией*. Относительное изменение линейных размеров ферромагнетика при намагничивании оценивается коэффициентом магнитострикции:

$$\lambda = \pm \frac{\Delta l}{l},$$

где Δl – удлинение образца ферромагнетика при намагничивании; l – исходная длина образца до намагничивания.

Значение и знак коэффициента магнитострикции зависят от направления намагничивания и вида ферромагнетика.

Так, при намагничивании кристалла железа по оси легкого намагничивания происходит его удлинение вдоль этой оси и, следовательно, коэффициент магнитострикции является положительным.

Если же железо намагничивать по оси трудного намагничивания, то происходит укорочение образца вдоль данной оси, т. е. коэффициент магнитострикции отрицателен.

В отличие от железа, у кристаллов никеля коэффициент магнитострикции отрицателен при намагничивании по оси легкого намагничивания 111, и положителен, если намагничивать кристалл по оси трудного намагничивания.

Удлинение или сжатие ферромагнетика в направлении намагничивающего поля сопровождается сжатием или удлинением, соответственно, в поперечном направлении.

Явление магнитострикции обнаруживается и во влиянии внешних механических воздействий на магнитные свойства ферромагнетиков.

Растяжение ферромагнетика внешними механическими силами вызывает облегчение, а сжатие – затруднение процесса намагничивания, если у ферромагнетика положительный коэффициент магнитострикции. Для материалов с отрицательным коэффициентом магнитострикции сжатие приводит к облегчению, а растяжение – к затруднению процесса намагничивания. Явление магнитострикции широко используется в технике. Например, в области ультразвуковой локации магнитострикционные материалы широко используются как источники ультразвука.

Явление магнитострикции, свойственное магнитным материалам, приводит к тому, что линейные размеры магнитопроводов машин переменного тока колеблются с частотой, равной частоте переменного магнитного поля. Это приводит к возникновению дополнительных механических напряжений в местах

крепления магнитопровода к корпусу электрической машины и появлению шума, что является нежелательным.

3.6. Намагничивание ферромагнетика

Если размагниченный ферромагнетик поместить в магнитное поле, то под воздействием напряженности поля начинается перераспределение магнитных моментов доменов, в результате которого появляется намагниченность ферромагнетика в направлении напряженности намагничивающегося поля.

Внутри ферромагнетика создается магнитная индукция, значение которой определяется намагниченностью ферромагнетика и напряженностью H намагничивающего поля:

$$B = \mu_0(H + M). \qquad (3.9)$$

В ферромагнетиках внутренняя намагниченность значительно больше напряженности намагничивающего поля ($H > M$). В связи с этим значение магнитной индукции, в основном, определяется внутренней намагниченностью ферромагнетика, а не напряженностью внешнего поля.

Рассмотрим подробнее процесс намагничивания ферромагнетика. На рис. 3.8. приведена основная кривая намагничивания .

Выделим на этой кривой участки, в пределах которых возрастание магнитной индукции обусловливается различными процессами.

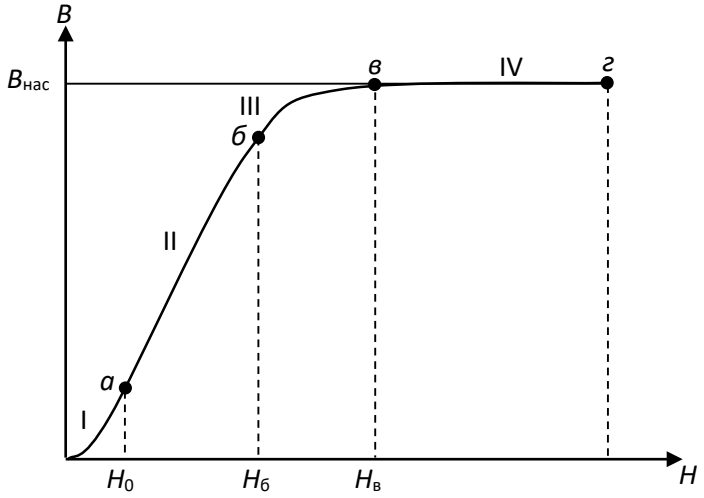


Рис. 3.8. Основная кривая намагничивания ферромагнетика

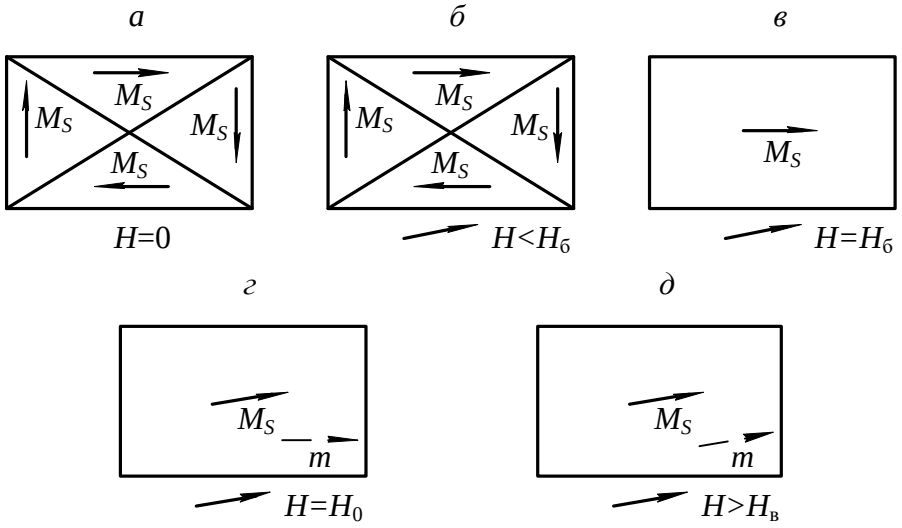


Рис. 3.9. Схема намагничивания ферромагнетика

Из параграфа 3.4. известно, что размагниченный образец ферромагнитного материала при отсутствии магнитного поля (H = 0) самопроизвольно разбивается на домены, направление намагниченности каждого из которых такое, что суммарная намагниченность образца в целом равна 0 (рис. 3.9, *а*).

Намагничиваем образец, плавно увеличивая напряженность магнитного поля. В диапазоне изменения напряженности H от 0 до $H_а$ происходит рост объема (смещение границ) тех доменов, у которых направление собственной намагниченности наиболее близко к направлению напряженности внешнего намагничивающего поля (рис. 3.9, *б*). Процесс роста домена в этом диапазоне осуществляется вполне упруго и без потерь энергии. Если напряженность поля опять уменьшить до 0, то ферромагнетик вернется в исходное размагниченное состояние (см. рис. 3.9, *а*).

При возрастании напряженности в диапазоне $H_а < H < H_б$ магнитная индукция за счет продолжающегося смягчения границ доменов с наименьшим углом между собственностью и напряженностью намагничивающегося поля (рис. 3.9, *б*). Только этот процесс приобретает необратимый характер и связан с потерями энергии. Необратимость процесса на участке II кривой намагничивания (см. рис. 3.8) обусловлена тем, что неоднородные внутренние напряжения, инородные включения, пустоты и дефекты, всегда имеющиеся в материале, препятствуют смещению границ доменов. Наличие препятствий приводит к тому, что при плавном повышении напряженности поля индукция в ферромагнетике изменяется скачкообразно. Скачкообразное изменение индукции вызывает появление микроскопических вихревых токов, при протекании которых происходит нагрев образца, т.е. в материале возникают потери энергии на намагничивание.

Чтобы размагнитить образец после того, как напряженность поля возросла до $H > H_а$, необходимо изменить направление напряженности поля на обратное и опять затратить энергию. Когда напряженность поля $H = H_б$, ферромагнетик приобретает однодоменную структуру строения (рис. 3.9, *в*), но направление намагниченности отлично от направления напряженности намагничивающегося поля.

Дальнейшее повышение напряженности поля вызывает рост магнитной индукции в образце за счет процесса ориентации магнитных моментов в направлении поля (поворот моментов). Когда направление магнитных моментов домена совпадает с направлением напряженности намагничивающего поля, рост магнитной индукции практически прекратится с ростом напряженности поля (рис. 3.9, *г*).

Такое состояние ферромагнетика называется техническим насыщением. Напряженность поля в точке «в» кривой намагничивания обозначается H_S и называется *напряженностью насыщения*.

С дальнейшим ростом напряженности поля ($H > H_в$) наблюдается медленное и весьма незначительное повышение намагниченности за счет парапроцесса, заключающегося в дополнительной ориентации спиновых моментов электронов, направление которых отлично от направления поля из-за теплового движения частиц.

3.7. Свойства ферромагнитных материалов в квазипостоянных магнитных полях

Квазипостоянным магнитным полем называется такое переменное поле, напряженность которого изменяется с частотой, близкой к 0, и амплитудой, равной H_m .

Если предварительно размагниченный образец поместить в квазипостоянное магнитное поле, то при возрастании напряженности поля от 0 до + H_m индукция в образце увеличивается в соответствии с основной кривой намагничивания (участок *ОА*, рис. 3.10).

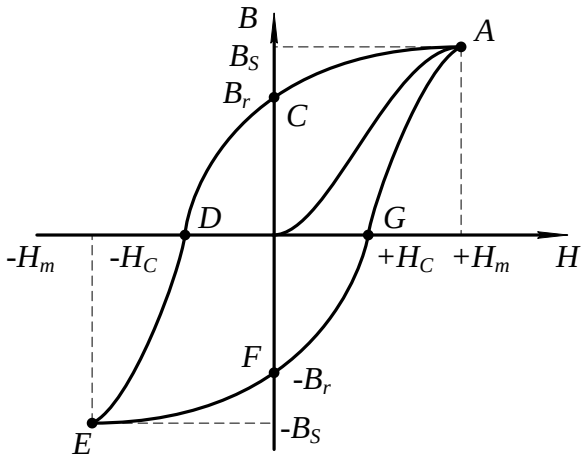


Рис. 3.10. Петля гистерезиса ферромагнетика

После того, как напряженность намагничивающего поля достигнет значения, равного амплитудному, она начинает уменьшаться до 0, вызывая снижение магнитной индукции за счет обратного поворота магнитного момента домена в направлении ближайшей оси легкого намагничивания. Когда напряженность поля станет равной 0, в ферромагнетике сохранится остаточная магнитная индукция B_r (участок *AC*, см. рис. 3.10). В дальнейшем напряженность намагничивающего поля изменяет свое направление на обратное и становится «отрицательной», вызывая дальнейшее уменьшение магнитной индукции (участок *CD*, см. рис. 3.10). На этом участке происходит необратимое разделение однодоменной структуры ферромагнетика на ряд доменов с различными направлениями собственных магнитных моментов. Когда напряженность поля H становится равной $-H_C$ (коэрцитивная сила), ферромагнетик приобретает структуру, аналогичную структуре строения до начала намагничивания, а индукция образца становится равной нулю (точка *D*, см. рис. 3.10).

На участке *DE* напряженность поля изменяется в пределах от $-H_C$ до $-H_m$. Магнитная индукция в образце возрастает за счет смещения границ доменов и последующей ориентации векторов намагниченности в направлении действия поля.

Достигнув амплитудного значения, напряженность магнитного поля начинает изменяться от $-H_m$ до 0.

Индукция в образце уменьшается до значения, равного остаточной магнитной индукции (участок *EF*) за счет процесса, аналогичного процессу размагничивания ферромагнетика на участке АС.

При изменении напряженности поля от 0 до $+H_C$ (участок *FG*) продолжается процесс размагничивания образца аналогично размагничиванию на участке *CD*. Когда $H = H_C$, индукция в образце равна 0.

Дальнейшее возрастание напряженности поля до амплитудного значения приводит к намагничиванию образца и возрастанию индукции.

Таким образом, зависимость магнитной индукции от напряженности квазипостоянного поля за полный цикл перемагничивания представляет петлю, называемую *петлей гистерезиса*.

Площадь петли гистерезиса пропорциональна потерям на гистерезис.

Если после каждого цикла перемагничивания увеличивать амплитуду напряженности квазипостоянного магнитного поля, то получится семейство петель гистерезиса. Причем большему значению амплитуды напряженности поля будет соответствовать петля с большей амплитудой магнитной индукции и площадью петли (рис. 3.11). Когда напряженность поля достигает значения, при котором наступает насыщение ферромагнетика, площадь петли гистерезиса максимальна. При дальнейшем возрастании амплитуды напряженности площадь петли остается постоянной, а в концах петли появляются прямолинейные участки со слабым возрастанием магнитной индукции.

Петля с наибольшей площадью называется *п р е д е л ь н о й п е т л е й г и с т е р е з и с а* .

По предельной петле гистерезиса определяются основные характеристики магнитных материалов, значения которых приводятся в справочниках; индукция технического насыщения, B_s; напряженность поля, при которой достигается насыщение ферромагнетика, H_s; остаточная индукция, B_r; коэрцитивная сила, H_c.

Если через вершины семейства петель гистерезиса провести линию, то полученная кривая $B_m = f(H_m)$ представляет собой основную кривую намагничивания.

По основной кривой намагничивания определяются абсолютная и относительная магнитные проницаемости:

$$\mu_a = \frac{B_m}{H_m}; \tag{3.10}$$

$$\mu_r = \frac{B_m}{(\mu_o \cdot H_m)}, \tag{3.11}$$

где μ_a – абсолютная магнитная проницаемость.

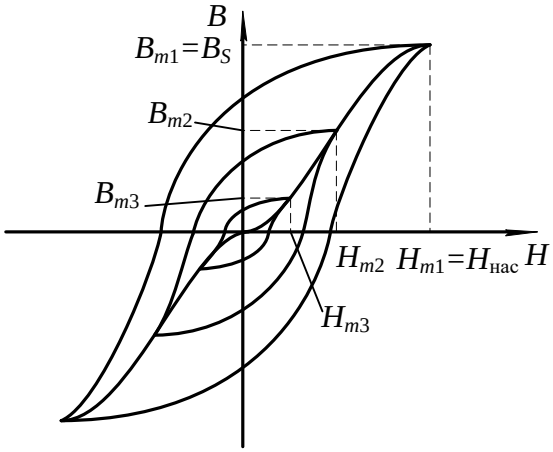


Рис. 3.11. Семейство петель гистерезиса

Определяя значение относительной магнитной проницаемости для каждого значения напряженности намагничивающего поля по основной кривой намагничивания, можно получить зависимость $\mu_r = f(H_m)$, (рис. 3.12).

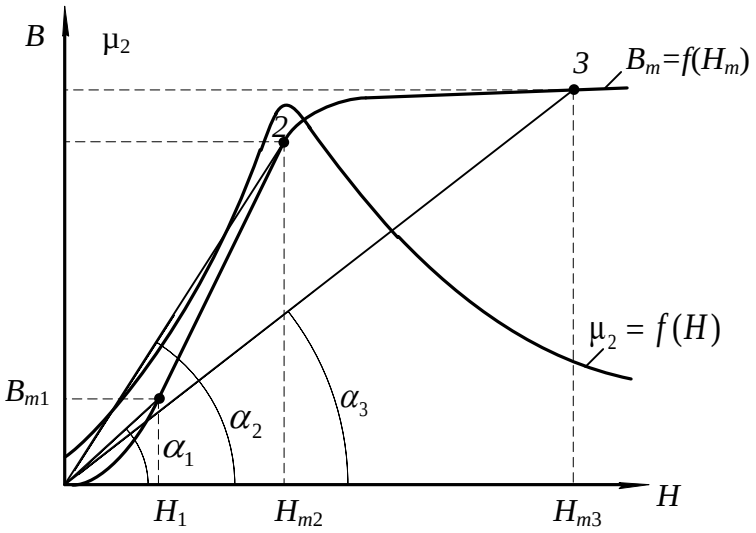


Рис. 3.12. Зависимость относительной магнитной проницаемости от напряженности поля

Как видно из рис. 3.12,относительная магнитная проницаемость с ростом напряженности поля вначале возрастает от $\mu_{нач}$ до μ_{max}, а затем уменьшается. Неоднозначный характер изменения μ_r связан с видом основной кривой намагничивания. Покажем это на примере. Допустим, что необходимо определить проницаемость материала μ_r в точках 1, 2 и 3.

Тогда, в соответствии с формулой (3.11):

$$\mu_{r1} = \frac{B_1}{(\mu_o \cdot H_1)};$$

$$\mu_{r2} = \frac{B_2}{(\mu_o \cdot H_2)};$$

$$\mu_{r3} = \frac{B_3}{(\mu_o \cdot H_3)}.$$

B_1 и H_1, B_2 и H_2, B_3 и H_3 с учетом масштабов по индукции и напряженности представляют собой катеты прямоугольных треугольников с вершинами O_{11}, O_{22} и O_{33} соответственно, а отношения B_1/H_1, B_2/H_2, B_3/H_3 являются тангенсами углов наклона, образованных прямыми, проведенными из начала координат в точки 1, 2, 3, на кривой намагничивания.

Вследствие переменной крутизны основной кривой намагничивания, угол наклона этих прямых сначала возрастает, затем, когда ферромагнетик входит в состояние насыщения, уменьшается с ростом напряженности намагничивающего поля. Максимальное значение магнитной проницаемости μ_r достигается в той точке кривой намагничивания, в которой прямая, соединяющая эту точку с началом координат, является касательной к кривой намагничивания. Значение магнитной проницаемости в этой точке обозначается $\mu_{r\ max}$ и обычно находится в начале участка *б – в* кривой намагничивания (см. рис. 3.8).

Определение магнитной проницаемости μ_r при напряженности поля $H = 0$ в соответствии с уравнением (3.11) лишено смысла, так как значение относительной магнитной проницаемости в этом случае неопределенно. В связи с этим введено понятие *начальной магнитной проницаемости* $\mu_{r\ нач}$.

За начальную магнитную проницаемость принимается предельное значение отношения индукции, деленной на магнитную постоянную, к напряженности при стремлении напряженности магнитного поля к нулю:

$$\mu_{r\ нач} = \frac{1}{\mu_o} \cdot \lim_{H \to 0} \frac{B}{H}. \qquad (3.12)$$

Практически начальная магнитная проницаемость $\mu_{r\ нач}$ определяется при напряженности поля $H \leq 0{,}1$ А/м.

Значения начальной $\mu_{r\ нач}$ и максимальной $\mu_{r\ max}$ магнитных проницаемостей для каждого магнитного материала приводятся в справочниках.

3.8. Дифференциальная магнитная проницаемость

Неоднозначность зависимости магнитной индукции от напряженности поля существенно усложняет расчет и анализ цепей, содержащих магнитные элементы. С целью упрощения, расчеты и анализ электромагнитных цепей часто ведутся по основной кривой намагничивания $B=f(H)$, что в ряде случаев приводит к существенным ошибкам. Особенно это касается тех ферромагнитных устройств, форма и значение выходного напряжения которых зависят от того, как и в каких пределах изменяется на напряженность магнитного поля. Для таких устройств введена еще одна характеристика магнитного материала – дифференциальная магнитная проницаемость:

$$\mu_{rg} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{dB}{dH}, \qquad (3.13)$$

где $\frac{dB}{dH}$ – производная от магнитной индукции по напряженности поля в заданной точке петли гистезиса.

Если определить μ_{rg} в каждой точке петли гистезиса, то можно получить зависимость $\mu_{rg}=f(H)$, представленную на рис. 3.13.

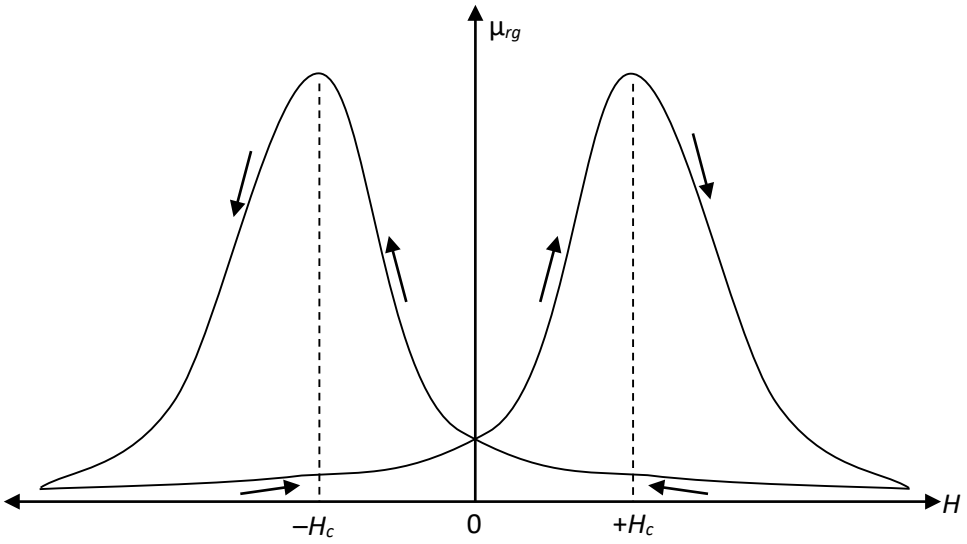


Рис. 3.13. Зависимость дифференциальной магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля

Полученная зависимость $\mu_{rg}=f(H)$ за полный цикл перемагничивания представляет собой замкнутую петлю с двумя максимумами. Максимальные значения μ_{rg} достигаются при напряженностях магнитного поля, приблизительно равных коэффициентной силе $H=\pm H_c$. Минимальные значения μ_{rg} соответствуют вершинам предельной петли гистезиса.

В диапазоне напряженности от 0 до $+H_c$ дифференциальная магнитная проницаемость возрастает до $\mu_{rg\max}$, т. к. возрастает производная от индукции по напряженности (крутизна петли гистезиса) $\frac{dB}{dH}$ (участок *FG*, рис. 3.10).

При изменении напряженности поля от $+H_c$ до $+H_m$ μ_{rg} уменьшается из-за уменьшения крутизны петли гистезиса (участок *GA* рис. 3.10).

Последующее уменьшение *H* от $+H_m$ до 0, вызывает медленное возрастание дифференциальной магнитной проницаемости, т. к. крутизна петли гистезиса на участке *AC* (рис. 3.10) медленно растет.

Характер зависимости $\mu_{rg}=f(H)$ при отрицательных значениях напряженности аналогичен характеру этой же зависимости при положительных значениях напряженности.

3.9. Свойства ферромагнетиков в переменных магнитных полях

3.9.1. Динамическая петля намагничивания

Когда на магнитный материал воздействует переменное магнитное поле, напряженность которого изменяется с частотой *f*, то он периодически перемагничивается с той же самой частотой. При таком циклическом перемагничивании зависимость магнитной индукции от напряженности магнитного поля представляет собой петлю, которая называется *динамической петлей намагничивания.*

Площадь динамической петли намагничивания больше площади петли гистерезиса, полученной при той же амплитуде напряженности поля. Это объясняется тем, что потери на перемагничивание в переменных магнитных полях больше, чем в квазипостоянных. Если изменять амплитуду напряженности переменного магнитного поля, то можно получить семейство динамических петель намагничивания (рис. 3.14).

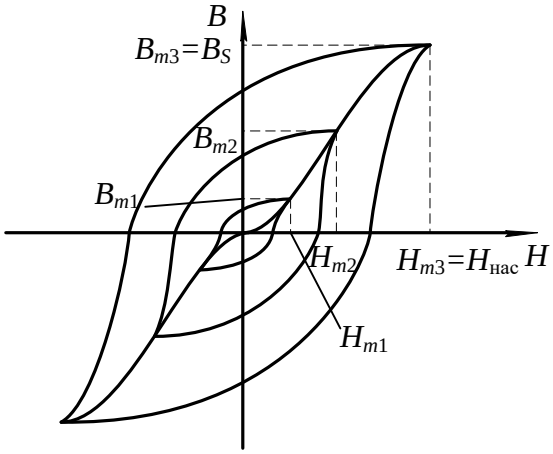


Рис. 3.14. Семейство динамических петель намагничивания

Как видно из рис. 3.14, с увеличением амплитуды напряженности магнитного поля растут амплитуда магнитной индукции и площадь динамической петли намагничивания. После того, как амплитуда напряженности поля достигает значения, при котором наступает насыщение магнитного материала, возрастание индукции и площади петли прекращается, а в вершинах петли появляются линейные участки, практически параллельные оси напряженности поля.

Петля с наибольшей площадью называется *предельной динамической петлей намагничивания.*

Если через вершины семейства динамических петель намагничивания провести линию, то полученная зависимость $B_m = f(H_m)$ называется *основной динамической кривой намагничивания*.

По предельной динамической петле намагничивания и динамической кривой намагничивания определяются основные характеристики магнитных материалов в переменном магнитном поле аналогично определению характеристик этих материалов в квазипостоянном магнитном поле.

3.9.2. Эффект вытеснения магнитного поля при перемагничивании ферромагнетиков в переменном поле

Перемагничивание в переменном магнитном поле приводит к появлению в магнитных материалах вихревых токов, протекание которых вызывает появление эффекта вытеснения магнитного поля из центра к периферии образца.

Рассмотрим подробнее это явление.

Пусть имеется образец магнитного материала площадью сечения S (рис. 3.15).

Можно разбить сечение такого образца на ряд элементарных замкнутых контуров толщиной Δh. Переменный магнитный поток, сцепляясь с каждым из элементарных витков, наводит в них ЭДС.

Под воздействием наведенной ЭДС в каждом из витков начнет протекать макроскопический вихревой ток, который создает свою магнитодвижущую силу $F_{вт}$, направленную противоположно основной магнитодвижущей силе, создающей переменный магнитный поток в образце. Таким образом, в переменном магнитном поле на магнитный материал воздействуют две магнитодвижущие силы, направленные встречно друг другу. В результате возникает результирующая магнитодвижущая сила (МДС), которая может быть определена как разность двух магнитодвижущих сил:

$$F_{р} = F - F_{вт},$$

где $F_{р}$ – результирующая МДС; F – основная МДС, создаваемая намагничивающим током; $F_{вт}$ – МДС вихревого тока.

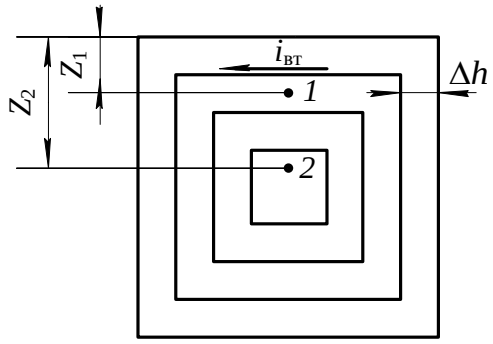


Рис. 3.15. К объяснению эффекта вытеснения

Известно, что значение магнитодвижущей силы вихревого тока в какой-либо точке сечения образца зависит от числа элементарных контуров, охватывающих данную точку. Поскольку точка *2* охвачена большим числом элементарных контуров с вихревыми токами, чем точка *1*, то можно сделать вывод, что магнитодвижущая сила вихревого тока возрастает по мере удаления от поверхности образца к центру (рис. 3.16). Экспериментально установлено, что МДС вихревого тока зависит от расстояния до заданной точки от поверхности образца по экспоненциальному закону (кривые $F_{вт1}$ и $F_{вт2}$).

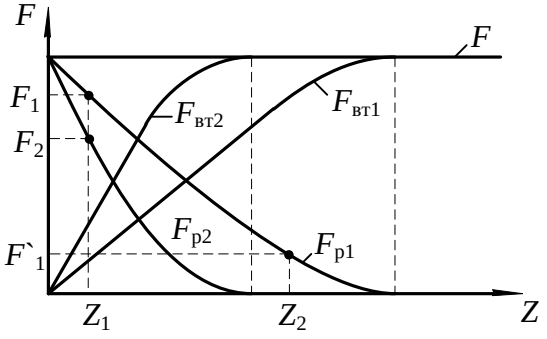


Рис. 3.16. Зависимость изменения результирующей МДС от расстояния до поверхности образца

На рис. 3.16 построены зависимости магнитодвижущих сил от расстояния Z для двух различных частот намагничивающего поля f_1 и f_2 ($f_1 > f_2$). Тогда

результирующая магнитодвижущая сила по мере удаления от поверхности образца к его центру убывает также по экспоненциальному закону (кривые F_{p1} и F_{p2}). Аналогично результирующей магнитодвижущей силе уменьшается и напряженность магнитного поля по мере удаления от поверхности образца к центру. Зависимость напряженности поля от расстояния определяется из уравнения:

$$H(Z) = H_{\max} \cdot e^{-bz}.$$

где H_{max} – напряженность поля на поверхности образца; Z – расстояние от поверхности образца; $b = 2\pi \frac{\sqrt{\frac{\mu_p \cdot \gamma}{T}}}{C}$; C – константа, обусловленная выбором системы единиц; T – период волны напряженности поля; γ – удельная проводимость образца.

В соответствии с изменением напряженности переменного магнитного поля уменьшается индукция в образце с увеличением расстояния от его поверхности. При достаточно большой толщине образца уменьшение индукции может привести к тому, что в центральной части сечения образца индукция будет равна 0, а магнитный поток в ней отсутствовать. Таким образом, за счет макроскопических вихревых токов возникает эффект вытеснения магнитного потока из центральной части сечения образца к периферии. Следовательно, из-за эффекта-вытеснения магнитного поля уменьшается площадь сечения образца, по которой проходит магнитный поток. Уменьшение площади сечения приводит к возрастанию магнитного сопротивления образца и соответствующему падению величины магнитного потока. Зависимость магнитного потока Ф в ферромагнетике от магнитодвижущей силы F и от сопротивления магнитной цепи $R_м$ описывается формулой

$$\Phi = \frac{F}{R_м}.$$

Магнитное сопротивление определяется по уравнению:

$$R_м = \frac{l}{S' \cdot \mu_a},$$

где и S' – длина и площадь сечения образца ферромагнетика, через которую проходит магнитный поток; μ_a – абсолютная магнитная проницаемость ферромагнетика.

Как видно из вышеприведенных равенств, уменьшение площади, по которой проходит магнитный поток, вызываем возрастание магнитного сопротивления образца. А увеличение магнитного сопротивления уменьшает

магнитный поток в ферромагнетике при неизменной магнитодвижущей силе. Т.к. геометрические размеры образца (длина и площадь сечения) остаются постоянными при намагничивании, то уменьшение магнитного потока к снижению магнитной индукции в образце:

$$B = \frac{\Phi}{S},$$

где S – геометрическая площадь сечения образца.

Для оценки влияния эффекта вытеснения на магнитное сопротивление образца используется характеристика, называемая *глубиной проникновения переменного магнитного поля в ферромагнетик*:

$$Z_1 = \frac{1}{b},$$

где Z_1 – глубина проникновения переменного магнитного поля.

Глубиной проникновения называется расстояние от поверхности образца, на котором амплитудное значение напряженности магнитного поля уменьшается в 2,7 раза, по сравнению с напряженностью поля на поверхности образца.

Глубина проникновения определяется химическим составом ферромагнетика и частотой магнитного поля.

Для ослабления эффекта вытеснения магнитопроводы электрических машин собирают из отдельных листов электротехнической стали, толщина которых не превышает Z_1. На поверхности листов стали наносятся электроизоляционные покрытия (лаковые, оксидные и т. п.), обладающие высокими электрическими сопротивлениями, наличие участков с высоким электрическим сопротивлением на пути протекания вихревых токов приводит к их уменьшению и соответственному ослаблению эффекта вытеснения.

При больших толщинах листов, чем Z_1 или цельнолитых магнитопроводах, магнитные свойства ферромагнетиков используются плохо из-за ярко выраженного эффекта вытеснения.

Существенное влияние на эффект вытеснения оказывает частота переменного магнитного поля. Это объясняется тем, что с ростом частоты увеличивается ЭДС $E_{вт}$, наводимая в элементарном контуре, так как значение ее прямо пропорционально частоте. Возрастание ЭДС приводит к увеличению вихревого тока и МДС $F_{вт}$. Поэтому на одном и том же расстоянии Z от поверхности образца (см. рис. 3.16) результирующая магнитодвижущая сила при большей частоте окажется меньше, чем при меньшей частоте намагничивающего тока. Следовательно, с ростом частоты глубина проникновения переменного магнитного поля уменьшается, что вызывает соответствующее снижение среднего значения индукции в образце.

На рис. 3.16 приведены зависимости $F_{\text{р}} = f(Z)$ для двух значений частоты магнитного поля. Зависимость $F_{\text{р}2} = f(Z)$ соответствует большей частоте магнитного поля, чем у $F_{\text{р}1} = f(Z)$.

3.9.3. Потери на перемагничивание в переменном магнитном поле

Потери мощности на перемагничивание в переменном магнитном поле больше, чем в квазипостоянном поле. Это связано с тем, что в переменном магнитном поле помимо потерь на гистерезис существуют также потери от вихревых токов и добавочные потери.

Потери мощности на перемагничивание определяются следующим образом:

$$P = P_r + P_{\text{вт}} + P_g, \tag{3.14}$$

где потери мощности на гистерезис:

$$P_r = \vartheta \cdot f \cdot B_{\max}^{n} \cdot V, \tag{3.15}$$

то же от вихревых токов:

$$P_{\text{вт}} = \xi \cdot f^2 \cdot B_{\max}^2 \cdot V, \tag{3.16}$$

где ϑ – коэффициент, зависящий от марки ферромагнетика; ξ – коэффициент, зависящий от марки ферромагнетика, толщины листа и формы образца; V – объем ферромагнитного образца; P_g – добавочные потери; n – коэффициент, значение которого определяется величиной индукции в ферромагнетике.

Коэффициент n принимает следующие значения:

$n = 1$ при $B_{\max} \le 0{,}1$ Тл;

$n = 1{,}6$ при $B_{\max} \approx 0{,}1 - 1{,}0$ Тл;

$n = 2 - 3$ при $B_{\max} > 1{,}0$ Тл.

Природа добавочных потерь полностью не выяснена. Эти потери связаны со структурой строения ферромагнетика, формой и размерами зерен вещества. При практических расчетах потерь их значение принимается примерно равным (0,2 – 0,3) от суммы потерь на гистерезис и вихревые токи:

$$P_g = (0{,}2 - 0{,}3) \cdot (P_r + P_{\text{вт}}).$$

3.9.4. Потери на перемагничивание в переменном магнитном поле

Определение свойств ферромагнитных материалов может производиться двумя методами. Первый из них заключается в следующем. Изменяется частота магнитного поля, а индукция, создаваемая в образце, поддерживается неизменной ($f = V_{ar}$, $B_m = \text{const}$). При втором методе с изменением частоты поля поддерживается неизменной напряженность магнитного поля ($f = V_{ar}$, $H_m = \text{const}$).

С увеличением частоты переменного магнитного поля, при условии постоянства амплитуды магнитной индукции, в образце $B_m = \text{const}$, форма динамической петли приближается к эллипсу, вытянутому по оси H (рис. 3.17).

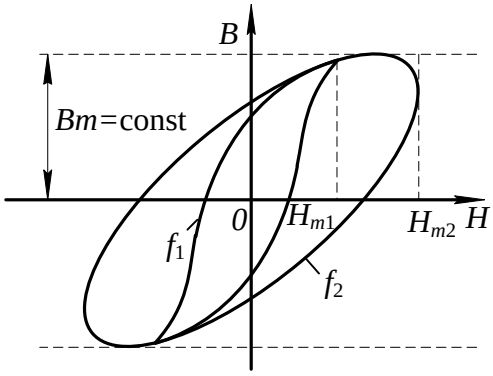


Рис. 3.17. Семейство динамических петель намагничивания

Площадь динамической петли с ростом частоты увеличивается пропорционально потерям мощности на перемагничивание.

Определив значения относительной магнитной проницаемости в вершинах семейства динамических петель намагничивания и потери на перемагничивание, можно построить зависимости $\mu_r = F(f)$ и $P = F(f)$. Эти зависимости приведены на рис. 3.18.

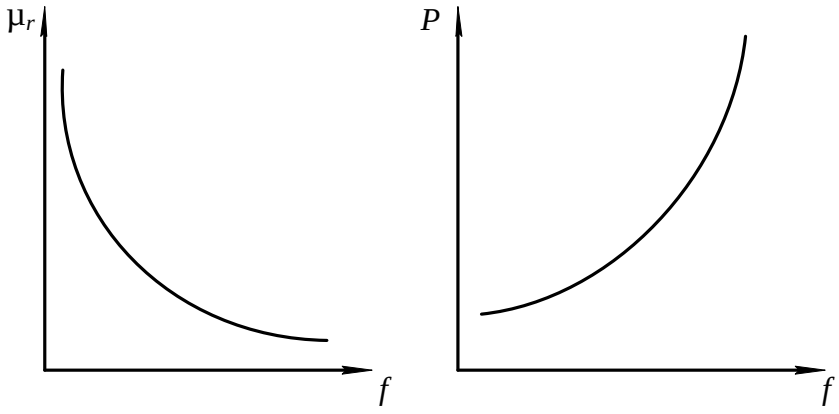


Рис. 3.18. Зависимости $\mu_r = F(f)$

Из рис. 3.18 видно, что с ростом частоты относительная магнитная проницаемость уменьшается. Это явление можно объяснить следующим. С возрастанием частоты переменного магнитного поля уменьшается среднее значение индукции в образце за счет усиления эффекта вытеснения магнитного поля.

Для того чтобы компенсировать уменьшение индукции, необходимо увеличивать напряженность намагничивающего поля. А так как

$$\mu_r = \frac{B_m}{H_m \cdot \mu_0},$$

то относительная магнитная проницаемость μ_r уменьшается с ростом частоты из-за увеличения амплитуды напряженности поля H_m.

При неизменной магнитной индукции характер изменения потерь мощности на перемагничивание определяется зависимостью этих потерь от вихревых токов. А так как потери мощности пропорциональны квадрату частоты переменного поля, то и зависимость этих потерь в ферромагнетике имеет квадратичный характер от изменения частоты (см. рис. 3.18).

Если увеличивать частоту переменного магнитного поля, поддерживая постоянной его напряженность, то форма динамической петли приближается к эллипсу, а амплитуда магнитной индукции уменьшается (рис. 3.19).

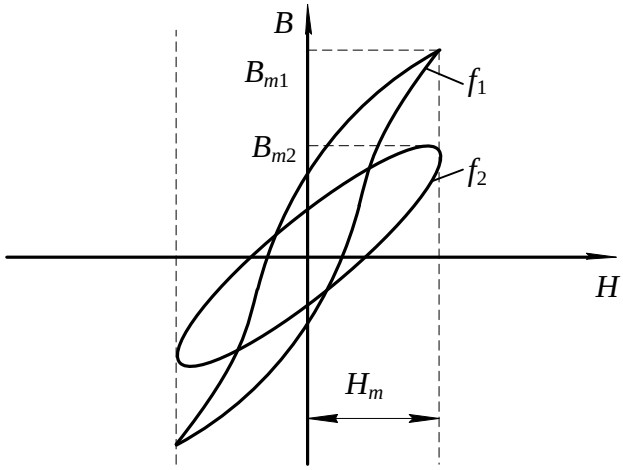


Рис. 3.19. Семейство динамических петель намагничивания при $H_m = \text{const}$

Определив по семейству динамических петель намагничивания значения магнитной проницаемости μ_r и потери мощности на перемагничивание, строим зависимости $\mu_r = F(f)$ и $P = F(f)$ (рис. 3.20).

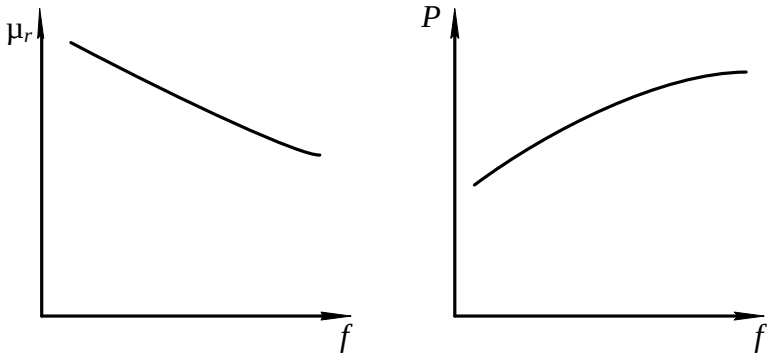


Рис. 3.20. Зависимости $\mu_r = F(f)$ и $P = F(f)$

С ростом частоты относительная магнитная проницаемость ферромагнетика уменьшается, но в меньших пределах, по сравнению с пределом изменения ее при $B_m = \text{const}$ в одном и том же интервале изменения частоты. Это объясняется тем, что с ростом частоты уменьшается амплитуда магнитной индукции ферромагнетика из-за усиления эффекта вытеснения. Электродвижущая сила, наводимая в элементарном контуре $E_{\text{вт}}$, зависит от индукции B_m и частоты f магнитного поля:

$$E_{\text{вт}} \approx S \cdot B_m \cdot f \ ,$$

где S – поперечное сечение образца.

Из приведенного уравнения видно, что электродвижущая сила вихревого тока при неизменной напряженности поля возрастает с увеличением частоты медленнее, чем при постоянной амплитуде магнитной индукции, так как рост ЭДС за счет частоты частично компенсируется ее уменьшением из-за снижения магнитной индукции. Медленное возрастание электродвижущей силы, а следовательно, и вихревого тока, протекающего по элементарному контуру, приводит к тому, что эффект вытеснения при неизменной амплитуде напряженности выражен менее ярко, чем при $B_m = \text{const}$.

Поэтому относительная магнитная проницаемость изменяется в меньшем диапазоне по сравнению со случаем, когда магнитная индукция поддерживалась неизменно.

Анализ уравнений (3.15, 3.16) показывает, что потери на гистерезис и вихревые токи возрастают незначительно с повышением частоты, так как их рост с повышением частоты частично компенсируется за счет уменьшения магнитной индукции в образце. Таким образом, потери на перемагничивание ферромагнетика в целом медленно увеличиваются с ростом частоты магнитного поля.

3.10. Индукционный метод определения параметров магнитных материалов с использованием осциллографа

Общие сведения

В связи с тем, что невозможно с достаточной степенью точности рассчитать характеристики магнитных материалов при намагничивании в переменном поле, широко используются экспериментальные методы их определения.

В настоящее время разработаны и используются на практике различные методы испытаний ферромагнитных материалов в переменном магнитном поле.

Основными из них являются:

- индукционный с использованием амперметра и вольтметра;
- индукционный с использованием фазочувствительного вольтметра (феррометр);
- индукционный с использованием осциллографического способа измерения (феррограф);
- индукционный с использованием компенсатора переменного тока;
- параметрический (мостовой).

При испытаниях индукционными методами измеряются ЭДС, индуктируемые в измерительных обмотках, и токи, протекающие по намагничивающим обмоткам, намотанным на образцах исследуемого магнитного материала.

Измерение ЭДС, пропорциональной магнитной индукции и намагничивающего тока, пропорционально магнитодвижущей силе намагничивающей обмотки, осуществляется с помощью либо показывающих приборов (амперметров и вольтметров) либо электронных осциллографов либо компенсаторов переменного тока.

Наиболее простым из индукционных методов является метод с использованием амперметра и вольтметра для определения магнитной проницаемости и потерь в образцах, основной динамической кривой намагничивания и динамических петель намагничивания. Недостатком этого метода является погрешность при перемагничивании материала до индукции свыше 1,2 Тл из-за отклонения формы кривой индукции от синуссидальной.

Наиболее точным из индукционных методов испытания магнитных материалов является компенсационный, основанный на измерении напряжений, пропорциональных индукций и напряженности магнитного поля с помощью компенсаторов переменного напряжения. С помощью этого метода определяется зависимости индукции от напряженности поля, потери на перемагничивание и т. д. Достоинствами способа являются полнота информации, высокая точность измерения, широкий диапазон измерения измеряемых величин. Недостатки заключаются в большой длительности процесса измерения, сложности и высокой стоимости аппаратуры.

Параметрический (мостовой) метод испытаний магнитных материалов, обеспечивающий высокую точность измерения в широком частотном диапазоне, заключается в определении индуктивности и сопротивления катушки с испытуемым образцом путем уравновешивания мостовой схемы изменением двух переменных параметров. Метод позволяет исследовать зависимости максимальной индукции от максимального значения напряженности поля, определять магнитную проницаемость, потери на перемагничивание и составляющие комплексного магнитного сопротивления. В основном мостовой метод предназначен для определения характеристик в слабых полях, когда

индукция в образце не превышает 80 % от индукции насыщения исследуемого материала.

Достоинствами данного метода являются высокая точность измерения, возможность определения практически всех характеристик, широкий частотный диапазон испытаний.

Наиболее удобным и наглядным методом исследования динамических характеристик магнитных материалов является индукционный с использованием осциллографа, суть которого заключается в измерении электрических напряжений, пропорциональных магнитной индукции и напряженности поля, с помощью электронно-лучевого осциллографа. Этот метод используется для измерения показателей и визуального наблюдения основной динамической кривой намагничивания, семейств динамических петель намагничивания, определения потерь на перемагничивание, дифференциальной магнитной проницаемости, абсолютной и относительной магнитных проницаемостей в диапазоне частот магнитного поля от 20 Гц до нескольких десятков кГц.

Основной недостаток этого метода заключается в сравнительно высокой погрешности используемого средства регистрации, составляющей несколько процентов.

Вышеперечисленные достоинства осциллографического метода измерения, обусловили его использование для исследования свойств магнитных материалов в лабораторной работе.

Рассмотрим более подробно суть этого метода.

Принципиальная электрическая схема установки для исследования магнитных материалов индукционным методом с использованием электронно-лучевого осциллографа приведена на рис. 3.21.

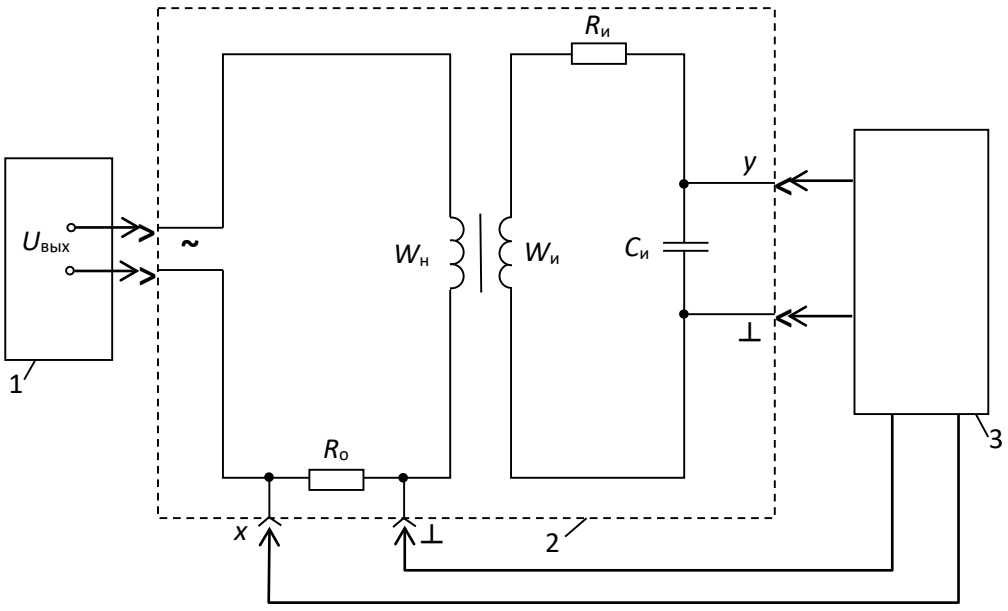


Рис. 3.21. Принципиальная электрическая схема установки:
1 – звуковой генератор; 2 – исследуемый образец; 3 - электронно-лучевой осциллограф

Для обеспечения необходимой точности измерений лучше всего применять образцы, в которых исключено влияние воздушных зазоров и рассеяния магнитного тока и в которых напряженность поля во всех точках образца практически одна и та же.

Чтобы выполнить данные требования, используются кольцевые (тороидальные) образцы и образцы в виде стержней с различным отношением длины к поперечному сечению.

Кольцевые образцы, намагничиваемые по замкнутому контуру, наиболее широко применяются для испытания магнитных материалов с максимальной напряженностью магнитного поля до 50 кА/м. Площадь сечения образца должна быть постоянной по всей длине. Разность между наибольшей и наименьшей площадями сечения допускается не более 1 %. Кольцевые образцы листовых и ленточных материалов изготавливают сборкой из штампованных и точеных колец или спиральной навивкой. Ферритовые образцы изготавливаются прессованием.

Внешний диаметр образца не должен превышать внутренний более чем в 1,3 раза. Это объясняется тем, что в кольцевых образцах с большим отношением внешнего диаметра к внутреннему наблюдается сильная неравномерность намагничивания, приводящая к значительным погрешностям при исследовании.

В работе исследуются образцы из различных магнитных материалов тороидальной формы, на каждом из которых намотано по две обмотки: намагничивающая $W_н$ и измерительная $W_и$.

Последовательно с намагничивающей обмоткой включено активное сопротивление $R_о$, а к зажимам измерительной обмотки подключена интегрирующая цепь, состоящая из пассивных элементов: активного сопротивления $R_и$ и конденсатора емкостью $C_и$.

При подаче на зажим «~» выходного напряжения звукового генератора $U_{вых}$ по намагничивающей обмотке образца начнет протекать намагничивающий ток $i_н$, который создает магнитодвижущую силу, вызывающую появление в образце магнитного поля.

Мгновенное значение магнитодвижущей силы F_t связано с мгновенным значением напряженности поля в любой точке образца H_t следующим соотношением:

$$F_t = i_н \cdot W_н = 2\pi \cdot r_{ср} \cdot H_t, \qquad (3.17)$$

где $i_н$ – мгновенное значение намагничивающего тока; $r_{ср}$ – средний радиус кольцевого образца, равный

$$r_{ср} = \frac{r_{вш} + r_{вн}}{2},$$

где $r_{вш}$ – внешний радиус сердечника образца; $r_{вш}$ – внутренний радиус сердечника образца.

Из уравнения (3.17) выразим H_t через намагничивающий ток. Получим:

$$H_t = \frac{i_н \cdot W_н}{2\pi \cdot r_{ср}}. \qquad (3.18)$$

Из выражения (3.18) видно, что мгновенное значение напряженности магнитного поля в любой точке образца прямопропорционально намагничивающему току $i_н$.

Таким образом, измерив значение намагничивающего тока и зная число витков намагничивающей обмотки и средний радиус образца, можно определить по уравнению (3.18) мгновенное значение напряженности магнитного поля.

Преобразовав выражение (3.18), получим уравнение для амплитудных значений напряженности поля и намагничивающего тока.

$$H_m = \frac{I_{mн} \cdot W_н}{2\pi \cdot r_{ср}}. \qquad (3.19)$$

Учитывая, что отклонение луча в электронно-лучевом осциллографе пропорционально значению напряжения, подаваемого на вход усилителя, возникает необходимость преобразования намагничивающего тока в напряжение. Это осуществляется последовательным включением с намагничивающей обмоткой эталонного активного сопротивления $R_о$ (рис. 3.21). При протекании тока $i_н$ по сопротивлению $R_о$, на последнем создается падение напряжения

$$U_x = R_о \cdot i_н.$$

Амплитудное значение этого напряжения

$$U_{mx} = R_о \cdot I_н. \qquad (3.20)$$

Подставив в уравнение (3.19) вместо тока $I_{mн}$ его выражение из (3.20), получим

$$H_m = \frac{W_н}{2\pi \cdot r_{ср} \cdot R_о} \cdot U_{mx}. \qquad (3.21)$$

Из уравнения (3.21) видно, что если на вход «*x*» падать напряжение U_{mx} с сопротивления $R_о$, то отклонение луча осциллографа по горизонтальной оси прямопропорционально напряженности магнитного поля в образце.

Магнитодвижущая сила тока $i_н$ создает в сердечнике образца магнитный поток, который наводит в измерительной наводке ЭДС

$$e = -W_и \cdot \frac{d\Phi_t}{dt} = -W_и \cdot S \cdot \frac{dB_t}{dt}. \quad (3.22)$$

где $W_и$ – число витков измерительной обмотки; Φ_t – мгновенное значение магнитного потока в сердечнике образца; S – площадь поперечного сечения сердечника образца; B_t – мгновенное значениемагнитной индукциив сердечнике образца.

Чтобы получить на экране осциллографа динамическую петлю намагничивания надо на вход «*y*» электронно-лучевого осциллографа подать напряжение, которое должно быть пропорционально магнитной индукции, создаваемой в образце. С этой целью измерительная обмотка образца подсоединяется по входу интегрирующей цепи с пассивными элементами $R_и$ и $C_и$ (рис. 3.21).

Тогда мгновенное значение тока, протекающего по интегрирующей цепи, определяется

$$i = \frac{e}{Z_и}. \quad (3.23)$$

Если выполнить условие $R_и >> x_{C_и}$, то можно считать, что ток в интегрирующей цепи является практически активным ($i=i_a$). Тогда напряжение на входе интегратора будет равно интегралу от ЭДС, наводимой в измерительной обмотке

$$U_{вых} = \frac{1}{C_и}\int_0^t i \cdot dt = \frac{1}{C_и}\int_0^t \frac{e}{R_и} \cdot dt \approx -\frac{W_и \cdot S}{R_и \cdot C_и} \cdot B_t. \quad (3.24)$$

Решив уравнение (3.24) относительно величины B_t получим

$$B_t = \frac{R_и \cdot C_и}{W_и \cdot S} \cdot U_{вых}, \quad (3.25)$$

где $R_и$ – активное сопротивление интегрирующей цепи; $C_и$ – емкость конденсатора этой цепи.

Из уравнения (3.25) видно, что индукция в образце пропорциональна выходному напряжению интегрирующей цепи.

Переходя к амплитудным значениям индукции и выходного напряжения интегрирующей цепи, получим

$$B_m = \frac{R_и \cdot C_и}{W_и \cdot S} \cdot U_{mвых}, \quad (3.26)$$

Подав напряжение с выхода интегратора $U_{m\text{вых}}$ на вход «*y*» и напряжение с сопротивления R_o на вход «*x*» осциллографа, на экране последнего получим динамическую петлю намагничивания.

Чтобы реакция измерительной цепи не влияла на форму динамической петли, желательно, чтобы магнитодвижущая сила тока измерительной обмотки была значительно меньше, чем магнитодвижущая сила тока намагниченной обмотки, т. е.

$$\frac{R_{\text{и}} \cdot C_{\text{и}}}{W_{\text{и}} \cdot S} \geq 0{,}001.$$

Для получения неискаженной формы динамической петли постоянная времени интегратора должна удовлетворять следующему требованию:

$$\tau_{\text{и}} = R_{\text{и}} \cdot C_{\text{и}} \geq (60 \div 100) \cdot \frac{1}{2\pi \cdot f_{\min}}, \qquad (3.27)$$

где $f_{\min}$ – наименьшая частота переменного магнитного поля.

По активному сопротивлению $R_{\text{и}}$ и емкости конденсатора $C_{\text{и}}$, рассчитывается постоянная времени интегрирующей цепи $\tau_{\text{и}}$ по уравнению

$$\tau_{\text{и}} = R_{\text{и}} \cdot C_{\text{и}}. \qquad (3.28)$$

Затем определяется наименьшая частота магнитного поля, при которой выходное напряжение интегратора пропорционально магнитной индукции в образце:

$$f_{\min} = \frac{60}{2\pi \cdot \tau_{\text{и}}}. \qquad (3.29)$$

При частоте магнитного поля $f<f_{\min}$ исследовать образец нельзя из-за больших искажений формы динамической петли намагничивания, вызываемых интегрирующей цепью образца.

3.11. Объект исследования

Образцы ферромагнитных материалов тороидальной формы с двумя обмотками: намагничивающей и измерительной. Параметры образцов и обмоток приведены в таблицах, расположенных на корпусах образцов. Параметры образцов и обмоток записываются в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Данные исследуемого образца

Номер образца			Данные схемы					
с р е д н о п и ц о			Число витков		о б р	Интегратор		н а и

			намагничивающей обмотки, $W_н$	измерительной обмотки, $W_и$		активное сопротивление, $R_и$, Ом	емкость, $C_и$, Ф	постоянная времени, $\tau_и$, С	

3.12. Средства измерения и вспомогательные средства исследования

Осциллограф универсальный типа CI-73.

Звуковой генератор с регулируемым напряжением и частотой.

3.13. Подготовка осциллографа к работе

Перед включением осциллографа установить органы управления на передней панели в следующие положения:

- ручку «яркость» – в крайнее левое;
- ручку «фокус» – в среднее;
- переключатель «V/дел» – 0,01;
- ручку «усиление» - крайнее правое;
- ручку «↕» – в среднее;
- переключатель «~⊥≂» в «≂»;
- ручку «уровень» – в крайнее правое»
- ручку «↔» – в среднее.

Далее установить тумблер «разверт. X» на правой боковой панели в положение «⋑ X». Подключить осциллограф кабелем питания к сети 220 В и включить тумблер «питание» на передней панели осциллографа. При этом должна загореться сигнальная лампочка. В течение 2-3 минут прогреть осциллограф. Пока осциллограф прогревается, необходимо нанести координатную сетку осциллографа на листки кальки. После прогрева осциллографа установите ручкой «яркость» удобную яркость точки. Рукояткой «↕» установите точку на горизонтальную ось экрана осциллографа. Рукояткой «↔» установите точку точно по центру экрана.

В результате выполнения вышеперечисленных операций осциллограф подготовлен к выполнению экспериментальной части лабораторной работы.

3.14. Калибровка осциллографа и определение масштабов по напряженности и индукции магнитного поля

Для определения амплитудных значений индукции и напряженности магнитного поля образца по динамическим петлям необходимо определить чувствительность осциллографа по входам «*x*» и «*y*». Если при зарисовке динамических петель намагничивания ручка «усиление» находится в крайнем правом положении, то чувствительность осциллографа по оси «*y*» определяется по числу, против которого находилась риска переключателя «*V*/дел», если осциллограф был правильно откалиброван. Для проверки правильности калибровки необходимо переключатель «*V*/дел» установить в положение «5 дел». При правильной калибровке на экране осциллографа появятся две горизонтальные линии или две точки, смещенные на 5 клеток (делений) относительно друг друга.

Пример: при зарисовке динамических петель намагничивания ручка «усиление» находится в крайнем правом положении, а переключатель «*V*/дел» – против числа 0,02. При переключении переключателя «*V*/дел» в положение «5 дел» на экране появились две горизонтальные линии на расстоянии 5 клеток друг от друга.

В этом случае масштаб осциллографа по входу «н» составляет

$$m_{\text{В}} = 0{,}02 \ \text{В/дел.}$$

Масштаб $m_{\text{в}}$ необходимо записать в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Определение масштабов по напряженности и индукции магнитного поля

Измерено				Вычислено			
$n_{\text{в}}$	$m'_{\text{в}}$	n_r	U_r	$m_{\text{в}}$	m_r	$M_{\text{в}}$	$M_{\text{н}}$
дел.	В/дел.	дел.	В	В/дел.	В/дел.	Т\мм	А/м/мм

Если ручка «усиление» находилась в положении, отличном от крайнего правого, то расчет масштаба осуществляется следующим образом. Сохраняя ручку «усиление» в том же положении, что и при зарисовке динамических петель намагничивания, переключатель «*V*/дел» установить в положение «5 дел». Измерить расстояние по вертикальной оси между двумя горизонтальными линиями или точками $n_{\text{в}}$ и записать в таблицу 3.3. Тогда чувствительность осциллографа по оси «*y*» может быть рассчитана следующим образом:

$$m_{\text{в}} = \frac{m'_{\text{в}}}{n_{\text{в}}} \cdot 5, \qquad (3.30)$$

где $m'_{\text{в}}$ – чувствительность осциллографа, определенная числом напротив переключателя «*V*/дел» в рабочем положении; $n_{\text{в}}$ – расстояние между горизонтальными линиями в дел.

Результат расчета записывается в табл. 3.3.

При калибровке усилителя сигнала на оси «*x*» необходимо соединить гнездо «⊖ X», расположенное на правой боковой панели. С гнездом « ⊖⎍ 1V», расположенным на левой боковой панели. Определить расстояние между двумя вертикальными линиями n_r и записать в табл. 3.3. Напряжение, подаваемое на вход усилителя *x*, равно 1 В. Тогда чувствительность осциллографа по горизонтальной оси (оси «*x*») рассчитывается по уравнению

$$m_r = \frac{U_r}{n_r}. \qquad (3.31)$$

Рассчитанное значение m_r записывается в табл. 3.3.

По определенным масштабам $m_{\text{в}}$ и $m_{\text{н}}$ рассчитываются масштабы по индукции и напряженности магнитного поля $M_{\text{в}}$ и $M_{\text{н}}$ по уравнениям

$$M_{\text{в}} = \frac{m_{\text{в}} \cdot R_{\text{и}} \cdot C_{\text{и}}}{6 \cdot W_{\text{и}} \cdot S}; \qquad (3.32)$$

$$M_{\text{н}} = \frac{m_r \cdot W_{\text{н}}}{6 \cdot R_{\text{о}} \cdot 2\pi \cdot r_{\text{ср}}}, \qquad (3.33)$$

где $r_{\text{ср}}$ – средний радиус сердечника, м; $R_{\text{о}}$ – образцовое сопротивление в цепи намагничивающей обмотки; $W_{\text{н}}$ – число витков намагничивающей обмотки; $W_{\text{и}}$ – число витков измерительной обмотки; $R_{\text{и}}$ – сопротивление интегрирующей цепи, Ом; $C_{\text{и}}$ – емкость интегрирующей цепи, ф; *S* – площадь поперечного сечения сердечника образца м^2.

Определенные масштабы $M_{\text{в}}$ и $M_{\text{н}}$ записываются в таблицу 3.3.

3.15. Подготовка звукового генератора к работе

Методика подготовки звукового генератора к работе, написана применительно к генератору Г3-53. При использовании генератора другого типа необходимо производить подготовку к работе согласно инструкции по эксплуатации или в соответствии с указанием преподавателя.

Перед включением звукового генератора необходимо установить органы управления на передней панели прибора в следующие положения:

- переключатель «поддиапазоны» – «Ок Hz»;

- рукоятку «частота Hz» – в положение при котором риска указателя частоты оказывается против цифры 0 на шкале частоты соответствующей поддиапазону 0 – 5 кГц;
- переключатель «пределы шкал, ослабление» – 3 в;
- рукоятка «регулировка выхода» – в положение, соответствующее значению выходного напряжения, равного нулю.

Затем следует подключить генератор кабелем питания к сети 220 В и включить переключатель «сеть». При этом должна загореться сигнальная лампа.

В течение 2 – 3 минут прогреть генератор. Если после прогрева вольтметр «напряжение выхода» покажет напряжение, отличное от нуля, необходимо плавным вращением рукоятки «уст. нуля» добиться нулевого показания вольтметра.

После выполнения вышеуказанных операций звуковой генератор подготовлен к работе.

3.16. Лабораторная работа №1. «Исследование свойств магнитных материалов в магнитных полях постоянной частоты». Цель работы

Целью лабораторной работы является ознакомление студентов с индукционным методом измерения магнитных величин и экспериментальное определение свойств и характеристик ферромагнитных материалов при воздействии на них магнитного поля постоянной частоты с изменяющейся по амплитуде напряженностью.

3.17. Рабочее задание

Собрать схему установки (рис. 3.21).

Зарисовать с экрана осциллографа семейство динамических петель намагничивания, начиная с предельной динамической петли до минимально различимой (6 – 7 петель.)

Произвести калибровку осциллографа.

По данным калибровки рассчитать масштабы по напряженности и индукции магнитного поля.

Для каждой из динамических петель намагничивания определить амплитудные значения напряженности и магнитной индукции.

Для каждой из динамических петель намагничивания определить удельные потери на перемагничивание.

Определить для каждой динамической петли значение магнитной проницаемости.

Рассчитать по предельной динамической петле дифференциальную магнитную проницаемость при различных значениях напряженности поля в диапазоне изменения ее от 0 до H_m и обратно.

Построить зависимости $B_m=F(H_m)$, $\mu_r=(H_m)$, $\mu_{rg}=(H)$, $P=F(B_m)$.

Сделать выводы по работе.

3.18. Методические рекомендации к выполнению рабочего задания

3.18.1. Подготовка к проведению эксперимента

Перед началом выполнения лабораторной работы необходимо получить у лаборанта комплект соединительных проводов, осциллограф, звуковой генератор и исследуемый образец по указанию преподавателя.

Данные образца записать в табл. 3.2.

По известным параметрам интегрирующей цепи образца рассчитайте наименьшую частоту магнитного поля $f_{\min}$ в соответствии с уравнением (3.29) и запишите ее в таблицу 3.2.

Соберите схему установки (рис. 3.21).

При сборке схемы, в соответствии с рис. 3.21, гнезда «вход *y*» и «⊥» исследуемого образца соединить с гнездом « ⋑ УІМ Ω 35*pF*» тракта вертикального отклонения луча осциллографа, а гнезда «вход *x*» и «⊥» образца с гнездом « ⋑ *X*» осциллографа.

Произведите подготовку осциллографа к работе в соответствии с методикой, изложенной в разделе 3.13 данных методических указаний и звукового генератора (раздел 3.15).

3.18.2. Рекомендации по зарисовке семейства динамических петель намагничивания

Увеличивая выходное напряжение генератора, получите на экране осциллографа предельную динамическую петлю намагничивания. Предельной динамической петлей является наибольшая по площади динамическая петля, у которой появляются «усы», свидетельствующие о начале насыщения. Наложив кальку с нанесенной координатной сеткой, зарисуйте предельную динамическую петлю намагничивания.

Уменьшая выходное напряжение звукового генератора, зарисуйте на кальку семейство 6 – 7 динамических петель от предельной до минимально различимой петли намагничивания.

3.18.3. Калибровка осциллографа

Калибровка осциллографа осуществляется в соответствии с пунктом 3.14 данных методических указаний. При калибровке положение точки «усиление» должно быть таким же как и во время зарисовки динамических петель.

3.18.4. Определение амплитудных значений индукции, напряженности магнитного поля и потерь в сердечнике образца на перемагничивание

По имеющимся на кальках изображениям определяются для каждой динамической петли намагничивания координаты вершин H'_m и B'_m в миллиметрах. Значения H'_m и B'_m записываются в табл. 3.4. Пример определения координат H'_m и B'_m приведен на рис. 3.22.

Таблица 3.4

Определение амплитудных значений индукции, напряженности магнитного поля и потерь в сердечнике образца на перемагничивание

Номер опыта	Измерено				Вычислено			
	f	B'_m	H'_m	S_n	B_m	H_m	μ_r	P
	Гц	мм	мм	мм^2	Т	А/м	10^3	Вт/кг

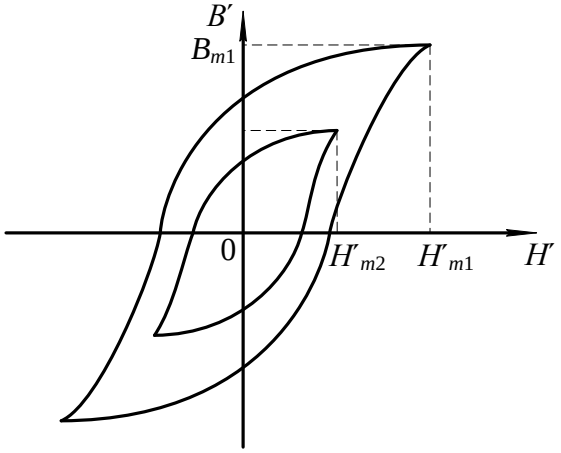


Рис. 3.22. Определение координат вершин динамических петель намагничивания

Амплитудные значения индукции и напряженности магнитного поля рассчитываются:

$$B_m = B'_m \cdot M_в . \qquad (3.34)$$

$$H_m = H'_m \cdot M_{\text{н}}. \qquad (3.35)$$

Для определения потерь на перемагничивание образца подсчитываются площади каждой из динамических петель намагничивания по клеткам миллиметровой бумаги, на которую накладывается калька с динамическими петлями намагничивания. Значения площадей записываются в табл. 3.4.

По найденным значениям B_m, H_m, S_n вычисляются значения относительной магнитной проницаемости и потери на перемагничивание для каждой петли

$$\mu_r = \frac{B_m}{\mu_{\text{о}} \cdot H_m}; \qquad (3.36)$$

$$P = \frac{S_n \cdot M_{\text{в}} \cdot M_{\text{н}}}{\gamma} \cdot f, \qquad (3.37)$$

где $\mu_{\text{о}}=1{,}256 \cdot 10^{-6}$ Гн/м – магнитная постоянная вакуума; f – частота намагничивающего потока, Гц; γ – плотность сердечника образца, кг/м^3.

Результаты расчетов записываются в табл.3.4.

3.18.5. Определение дифференциальной магнитной проницаемости

Определение дифференциальной магнитной проницаемости производится по предельной динамической петле намагничивания в следующем порядке. В интервале изменения H' от 0 до H'_m откладываются 6 – 7 значений H' (H'_0, H'_1, H'_2 … H'_m) на одинаковом расстоянии друг от друга. Затем в окрестности каждого значения H' задаются приращениями $\Delta H'$ так, чтобы эти значения Н′ находились посередине отрезка равного $\Delta H'$ (рис. 3.23).

Проведя из концов $\Delta H'$ линии, параллельные оси В до пересечения с восходящей и нисходящей ветвями предельной динамической петли намагничивания, определяем для каждого значения напряженности поля приращение индукции $\Delta B'_1$ и $\Delta B'_2$. $\Delta B'_1$ – приращение индукции, когда размагничивание осуществляется по нисходящей ветви при уменьшении напряженности поля от H'_m до 0.

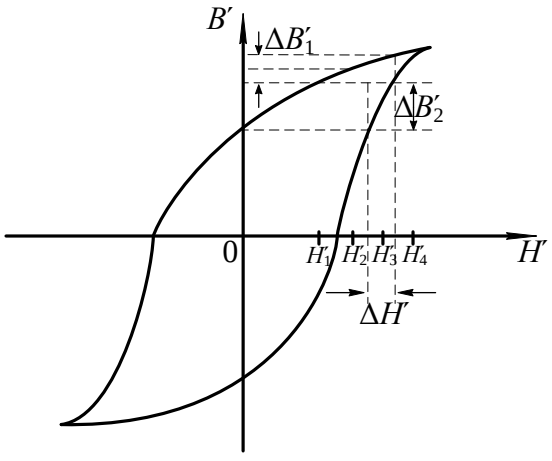


Рис. 3.23. К определению дифференциальной магнитной проницаемости

Значения напряженности $\Delta H'$, приращений $\Delta H'$, $\Delta B'_1$, $\Delta B'_2$ записываются в таблицу 3.5.

Таблица 3. 5

Определение дифференциальной магнитной проницаемости

H', мм	$\Delta H'$, мм	$\Delta B'_1$, мм	$\Delta B'_2$, мм	H, А/м	ΔH, А/м	ΔB_1, Тл	ΔB_2, Тл	μ'_{rg}	μ''_{rg}

Затем производится перерасчет значений напряженности H' по уравнению (3.35), а $\Delta H'$, $\Delta B'_1$, $\Delta B'_2$ по нижеследующим формулам

$$\Delta H = \Delta H' \cdot M_{\text{н}}, \tag{3.38}$$

$$\Delta B_1 = \Delta B_1^{'} \cdot M_{\text{в}}, \tag{3.39}$$

$$\Delta B_2 = \Delta B_2^{'} \cdot M_{\text{в}}. \tag{3.40}$$

Значения дифференциальной магнитной проницаемости рассчитывается по формулам

$$\mu_{rg}^{'} = \frac{\Delta B_1}{\mu_{\text{о}} \cdot \Delta H}, \tag{3.41}$$

$$\mu_{rg}^{''} = \frac{\Delta B_2}{\mu_{\text{о}} \cdot \Delta H}. \tag{3.42}$$

При построении зависимости $\mu_{rg}=F(H)$ по оси абсцисс откладываются значения напряженности Н, а по оси ординат соответствующие им значения μ'_{rg} и μ''_{rg}. В результате построения должен получится график, представленный на рис. 3.24.

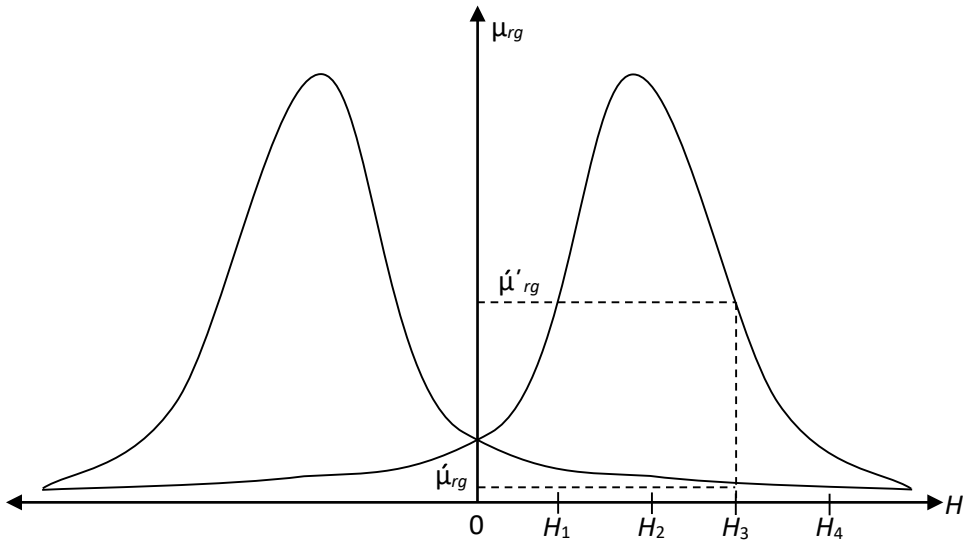


Рис. 3.25. Зависимость $\mu_{rg}=F(H)$

3.19. Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен иметь следующее содержание:

1. Цель лабораторной работы.

2. Характеристика и основные параметры исследуемого образца.

3. Характеристики средства измерения и вспомогательных средств исследования.

4. Таблицы с записью результатов экспериментальных исследований и расчетов.

5. Основные расчетные формулы.

6. Зависимости магнитной индукции $B_m=F(H_m)$ и относительной магнитной проницаемости $\mu_r=F(H_m)$, дифференциальной магнитной проницаемости $\mu_{rg}=F(H)$ от напряженности магнитного поля.

7. Зависимость потерь на перемагничивание от индукции в образце $P=F(B_m)$.

Зависимости магнитной индукции $B_m=F(H_m)$ и относительной магнитной проницаемости $\mu_r=F(H_m)$ необходимо строить в одной системе координат, откладывая по оси абсцисс значения H_m, а по оси ординат значения B_m и μ_r, в выбранных для каждой из этих величин масштабах.

Отчет заканчивается выводами, в которых в краткой форме должны быть описаны характеры полученных экспериментально зависимостей и дано их теоретическое обоснование.

3.20. Вопросы для самоконтроля

1. Как зависит относительная магнитная проницаемость от напряженности магнитного поля?
2. Чем объяснить, что сначала магнитная проницаемость возрастает с ростом напряженности, а затем уменьшается при дальнейшем возрастании последней?
3. Как изменяется магнитная индукция в образце с ростом напряженности намагничивающего поля?
4. На чем основан принцип действия лабораторной установки?
5. Какими параметрами установки ограничивается наименьшая частота намагничивающего тока?
6. Определите наименьшую частоту магнитного поля, при которой можно исследовать образец.

7. Как зависят потери на перемагничивание от магнитной индукции, создаваемой в образце?
8. Какие причины обуславливают рост потерь на перемагничивание с ростом магнитной индукции?
9. Объясните, как осуществляется намагничивание ферромагнетиков на различных участках основной кривой намагничивания?
10. В какой точке основной кривой намагничивания относительная магнитная проницаемость максимальна?
11. Каким основным условиям должно удовлетворять вещество, являющееся ферромагнетиком?
12. Какой из видов элементарного движения электрических зарядов создает основной магнитный момент в атоме?
13. Какое явление называется магнитной анизотропией?
14. Какое явление называется магнитострикцией?
15. Почему ферромагнетик самопроизвольно делится на отдельные области, домены?
16. Какая область ферромагнетика называется доменом?
17. Как и где происходит изменение направления намагниченности между доменами?

3.21. Лабораторная работа №2. «Исследование свойств магнитных материалов в магнитных полях переменной частоты». Цель работы

Целью лабораторной работы является ознакомление студентов с индукционным методом измерения магнитных величин и экспериментальное определение свойств и характеристик магнитных материалов при воздействии на них магнитного поля переменной частоты.

3.22. Рабочее задание

Рассчитать для полученного образца постоянную времени интегрирующей цепочки $\tau_и$ и минимальную частоту магнитного поля, при которой его можно исследовать.

Собрать схему установки (рис. 3.21).

Зарисовать с экрана осциллографа семейство динамических петель намагничивания при различных частотах намагничивающего тока, поддерживая неизменной магнитную индукцию B_m=const.

Зарисовать семейство динамических петель намагничивания при различных частотах намагничивающего тока, поддерживая неизменной напряженность магнитного поля H_m=const.

Произвести калибровку осциллографа.

По данным калибровки рассчитать масштаб по напряженности и индукции магнитного поля.

Для каждой из динамических петель намагничивания рассчитать амплитудные значения напряженности и магнитной индукции.

Для каждой из динамических петель намагничивания определить потери на перемагничивание образца.

Рассчитать для каждой динамической петли значение относительной магнитной проницаемости.

Построить зависимости $\mu_r=F(f)$, $P=F(f)$ для обоих семейств динамических петель намагничивания.

Сделать выводы по работе.

3.23. Методические указания к выполнению рабочего задания

3.23.1. Подготовка к проведению эксперимента.

Подготовка к проведению эксперимента осуществляется в соответствии с пунктом 3.18.1.

3.23.2. Рекомендации по зарисовке семейств динамических петель намагничивания.

Перед началом экспериментальных исследований выбирается диапазон частот магнитного поля в пределах от f_{min} до f_{max}, который задается преподавателем.

Зарисовка динамических петель намагничивания при различных частотах магнитного поля с неизменной магнитной индукцией в образце B_m=const производится в следующем порядке. Необходимо установить на генераторе частоту $f=f_{max}$. Увеличивая выходное напряжение генератора добиться, чтобы динамическая петля намагничивания касалась двух горизонтальных линий, отстоящих друг от друга на расстоянии 5 клеток (рис. 3.26) и зарисовать на кальку.

Затем уменьшить частоту генератора на Δf. При этом амплитуда B_m возрастает. Уменьшая выходное напряжение генератора, восстановить прежнее значение индукции B_m в образце и снова зарисовать динамическую петлю намагничивания. В диапазоне изменения частоты генератора от f_{max} до f_{min}

необходимо зарисовать шесть – семь петель, сохраняя индукцию в образце неизменной при каждой частоте.

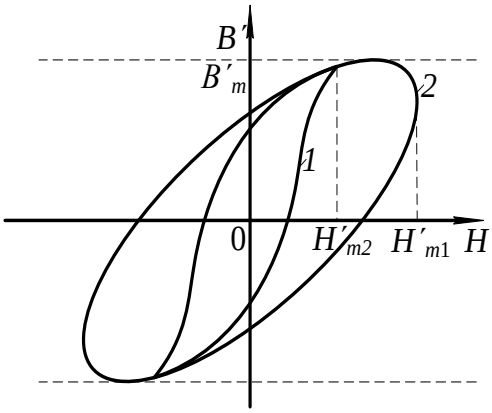


Рис. 3.26. Свойство динамических петель намагничивания с постоянной магнитной индукцией и различной частотой магнитного поля

Зарисовка семейства динамических петель намагничивания на различных частотах магнитного поля при постоянной напряженности магнитного поля в образце производится следующим образом. Частота звукового генератора устанавливается равной $f_{\min}$. Увеличивая выходное напряжение генератора добиваются максимальной по размеру экрана магнитной индукции B_m. Через вершины петель паралельно оси B_m проводятся две вертикальные линии на кальке. Затем увеличивают частоту генератора до следующего значения. При этом ширина динамической петли или H_m уменьшится. Увеличивая выходное напряжение генератора, добиваются, чтобы динамическая петля касалась линий, проведенных параллельно оси B_m и зарисовывают петлю на кальку (см. рис. 3.27).

Изменяя частоту генератора в диапазоне от $f_{\min}$ до $f_{\max}$ зарисовывают 6 – 7 динамических петель намагничивания на различных частотах, сохраняя H_m=const по вышеприведенной методике.

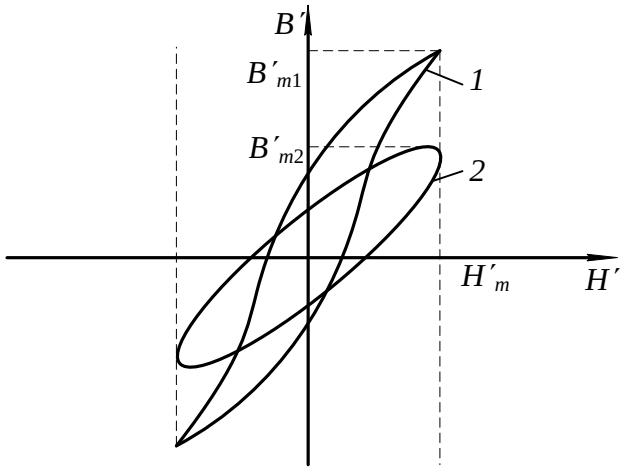


Рис. 3.27. Семейство динамических петель намагничивания при H_m=const

3.23.2. Рекомендации по зарисовке семейств динамических петель намагничивания.

Определение амплитудных значений индукции и напряженности магнитного поля потерь в сердечнике, значений относительной магнитной проницаемости для вершин каждой из зарисованных динамических петель намагничивания производится в соответствии с методикой, изложенной в пункте 3.18.4 данных методических указаний.

3.24. Содержание отчета

Содержание отчета по данной лабораторной работе должно отличаться от содержания отчета по лабораторной работе 1 (см. 3.19) полученными экспериментально зависимостями.

В этой работе определяются и строятся графики зависимостей $\mu_r=F(f)$, $P=F(f)$, когда B_m=const, и эти же зависимости, когда H_m=const. Необходимо строить зависимости $\mu_r=F(f)$ при B_m=const и $\mu_r=F(f)$ при H_m=const в одной системе координат откладывая по оси абсцисс значения H_m, а по оси ординат – значения μ_r.

Аналогично, в одной системе координат строятся зависимости $P=F(f)$ для обоих режимов испытания образца.

3.25. Вопросы для самоконтроля

1. Чем отличается динамическая петля намагничивания от петли гистерезиса?
2. Какие виды потерь существуют при перемагничивании ферромагнетика в переменном магнитном поле?
3. От каких параметров намагничивающего поля и как зависят потери на гистерезис?
4. От каких параметров намагничивающего поля и как зависят потери на вихревые токи?
5. Объясните суть явления вытеснения магнитного поля.
6. К каким последствиям приводит явление вытеснения магнитного поля?
7. Почему с ростом частоты уменьшается индукция, если B_m=const?
8. Почему с ростом частоты уменьшается магнитная индукция, если H_m=const?
9. Как и почему изменяются потери на перемагничивание с ростом частоты при B_m=const?

10. Как и почему изменяются потери на перемагничивание с ростом частоты при H_m=const?
11. Почему в одном и том же диапазоне изменения частоты относительная магнитная проницаемость изменяется в больших пределах, когда, как и почему изменяются потери на перемагничивание с ростом частоты при B_m=const, а не при H_m=const?
12. Почему в одном и том же диапазоне изменения частоты потери на перемагничивание ферромагнетика изменяются в больших пределах при B_m=const, а не при H_m=const?

Часть 4
КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 1. «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ИЗОЛЯЦИИ ДВУХЖИЛЬНОГО КАБЕЛЯ»

4.1. Требование к оформлению контрольной работы

Контрольная работа состоит из двадцати вариантов с нумерацией вариантов от 0 до 19.

Номер варианта задачи, решаемой студентов в контрольной работе, определяется суммой двух последних цифр шифра студента. Например, если номер шифра студента 4298, то номер варианта задачи – 17.

К оформлению контрольной работы предъявляются следующие требования:

1. Контрольная работа выполняется в тетради, на обложке которой должны быть указаны фамилия, имя, отчество студента, учебный шифр, наименование дисциплины и домашний адрес.

2. Условия задачи переписываются полностью, без сокращений.

3. Текстовая часть, формулы, числовые выкладки должны быть выполнены чернилами без помарок и исправлений.

4. Графическая часть работы выполняется в карандаше с помощью чертёжных инструментов.

5. Электрические схемы вычерчиваются с соблюдением установленных стандартом условных обозначений.

6. Ответы на вопросы должны быть аргументированы теоретически с использованием в необходимом объёме рисунков, графиков.

7. В конце работы необходимо привести список использованной при выполнении контрольной работы литературы.

8. После списка литературы необходимо проставить дату выполнения работы и подпись.

4.2. Задание на контрольную работу

Питание электротехнической установки осуществляется с помощью кабельной линии длиной l. Кабель со свинцовой оболочкой имеет две токопроводящие жилы радиусом R (Рис.1). В качестве электрической изоляции жил друг от друга и жил от оболочки использована кабельная бумага. В пористой структуре диэлектрика имеются капилляры, заполненные воздухом. К жилам кабеля приложено переменное напряжение, действующее значение которого U, частотой f . При расчёте считать, что электрическое поле внутри кабеля однородно.

Требуется определить:

1) ёмкость между жилами кабеля, $C_к$;
2) сопротивление изоляции между жилами кабеля, $Z_{из}$;
3) значение тока утечки между жилами кабеля, $I_у$;
4) диэлектрические потери в изоляции кабеля, P;
5) пробивное напряжение изоляции между жилами кабеля, $U_{пр}$;
6) ёмкость $C_{кп}$, сопротивление изоляции $Z_{изп}$ и ток утечки $I_{уп}$ диэлектрические потери $P_п$, пробивное напряжение $U_{прп}$ при условии, что оболочка кабеля заполнена газообразным либо жидким диэлектриком. При расчёте принять, что поры и капилляры полностью заполнены этим диэлектриком;
7) после расчёта составить таблицу сравнительных данных кабелей без пропитки и с пропиткой и произвести анализ влияния пропитки изоляции кабеля на его электрические свойства;
8) определить соответствие изоляционных свойств электрической изоляции кабеля требованиям правил установки электропотребителей (ПУЭ);

Геометрические размеры кабеля и электрические параметры диэлектриков, использованных в качестве изоляции, приведены в таблице 4.1.

Вопросы к контрольной работе

1. Дайте расшифровку цифр, используемых в обозначениях марок электрических сталей.
2. На основной кривой намагничивания укажите участки, на которых намагничивание осуществляется за счёт роста доменов. В чём отличие процессов намагничивания на этих участках?
3. Как влияют на магнитные свойства материалов вихревые токи. В каких магнитных полях возникают эти токи?

Таблица 4.1

Исходные данные для решения контрольной работы

Номер варианта	Длинна линии l	Радиус жилы, R	Расстояние между жилами, S	Рабочее напряжение, U	Частота, f	Плотность		Относительная диэлектрическая проницаемость			Тангенс угла диэлектрических потерь			Электрическая прочность		
						Целлюлозы, D_1	Бумаги, D	Целлюлозы, ε_{21}	Воздуха, ε_{22}	Пропитки, ε_{23}	Целлюлозы, $tg\delta_1$	Воздуха, $tg\delta_2$	Пропитки, $tg\delta_3$	Целлюлозы, $E_{пр1}$	Воздуха, $E_{пр2}$	Пропитки, $E_{пр3}$
	м	мм	мм	В	Гц	кг/м^3	кг/м^3				10^{-4}	10^{-6}	10^{-3}	кВ/мм	кВ/мм	кВ/мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
0	120	1,38	7,5	220	50	1550	780	6,6	1,00059	2,1	65,0	4,0	3,0	15,0	3,2	20,0
1	50	1,78	8,3	380	50	1550	850	6,6	1,00059	2,7	65,0	4,0	10,0	15,0	3,2	60,0

2	1000	2,25	12,24	2200	50	1550	1100	6,6	1,00059	4,5	65,0	4,0	25,0	15,0	3,2	50,0
3	800	2,82	13,58	1100	50	1550	1090	6,6	1,00059	4,1	65,0	4,0	15,0	15,0	3,2	55,0
4	150	3,34	17,92	6600	50	1550	780	6,6	1,00059	2,8	65,0	4,0	0,2	15,0	3,2	43,0
5	1500	3,99	19,42	3300	50	1550	770	6,6	1,00059	5,2	65,0	4,0	30,0	15,0	3,2	35,0
6	3000	4,72	14,18	6600	50	1550	900	6,6	1,00059	4,8	65,0	4,0	5,0	15,0	3,2	20,0

Окончание табл. 4.1

Номер варианта	Длинна линии l	Радиус жилы, R	Расстояние между жилами, S	Рабочее напряжение, U	Частота, f	Плотность		Относительная диэлектрическая проницаемость			Тангенс угла диэлектрических потерь			Электрическая прочность		
						Целлюлозы, D_1	Бумаги, D	Целлюлозы, ε_{21}	Воздуха, ε_{22}	Пропитки, ε_{23}	Целлюлозы, $tg\delta_1$	Воздуха, $tg\delta_2$	Пропитки, $tg\delta_3$	Целлюлозы, $E_{пр1}$	Воздуха, $E_{пр2}$	Пропитки, $E_{пр3}$
	м	мм	мм	В	Гц	кг/м^3	кг/м^3				10^{-4}	10^{-6}	10^{-3}	кВ/мм	кВ/мм	кВ/мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
7	500	5,5	15,74	380	50	1550	970	6,6	1,00059	2,4	65,0	4,0	3,0	15,0	3,2	18,0
8	250	6,18	19,5	2200	50	1550	800	6,6	1,00059	1,01	65,0	4,0	4,0	15,0	3,2	20,0
9	2000	6,91	20,76	1100	50	1550	1100	6,6	1,00059	3,8	65,0	4,0	0,2	15,0	3,2	45,0
10	200	7,68	24,8	3300	50	1550	1100	6,6	1,00059	2,1	65,0	4,0	3,0	15,0	3,2	20,0
11	4000	8,74	27,3	6600	50	1550	850	6,6	1,00059	2,3	65,0	4,0	1,0	15,0	3,2	18,0
12	3500	1,38	11,2	1100	50	1550	780	6,6	1,00059	5,0	65,0	4,0	20,0	15,0	3,2	42,0
13	1600	1,78	11,2	2200	50	1550	900	6,6	1,00059	4,4	65,0	4,0	5,0	15,0	3,2	45,0
14	600	7,68	20,1	220	50	1550	770	6,6	1,00059	2,8	65,0	4,0	0,2	15,0	3,2	24,0
15	800	8,74	22,2	660	50	1550	970	6,6	1,00059	4,8	65,0	4,0	8,0	15,0	3,2	25,0
16	300	2,25	16,14	3300	50	1550	1090	6,6	1,00059	2,7	65,0	4,0	10,0	15,0	3,2	25,0
17	1400	3,34	17,92	6600	50	1550	780	6,6	1,00059	1,019	65,0	4,0	0,2	15,0	3,2	50,0
18	700	6,18	17,1	660	50	1550	780	6,6	1,00059	3,8	65,0	4,0	20,0	15,0	3,2	32,0

4.3. Методические указания к выполнению контрольной работы

Кабельная бумага представляет собой механическую смесь целлюлозы и воздуха с неодинаковой относительной диэлектрической проницаемостью. Определение относительной диэлектрической проницаемости такого диэлектрика производится в соответствии с уравнением Лихтенеккера для последовательного расположения компонентов. В связи с тем, что при использовании этого уравнения необходимо знать объёмные концентрации компонентов, расчёт следует начать с

определения последних по заданным значениям плотности целлюлозы и кабельной бумаги в соответствии с уравнениями

$$\theta_1 = \frac{D}{D_1}\ ; \tag{4.1}$$

$$\theta_2 = 1 - \frac{D}{D_1}, \tag{4.2}$$

где θ_1 – объёмная концентрация целлюлозы; θ_2 – объёмная концентрация воздуха; D – плотность кабельной бумаги, кг/м^3; D_1 – плотность целлюлозы, кг/м^3.

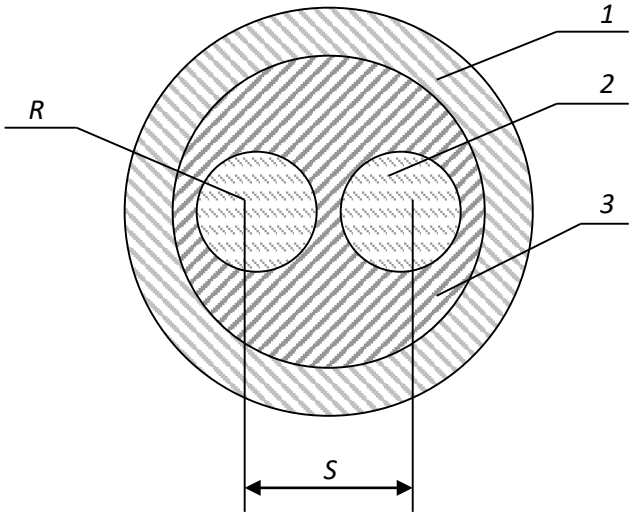


Рис. 4.1. Сечение двужильного кабеля
1- оплётка кабеля; 2- жила кабеля; 3- изоляция кабеля

По вычисленному значению относительной диэлектрической проницаемости непропитанной кабельной бумаги и заданным геометрическим размерам кабеля рассчитывается ёмкость кабельной линии.

Для двухжильного кабеля ёмкость между жилами может быть определена из уравнения:

$$C_k = \xi_r \cdot \xi_0 \times \frac{2 \cdot \pi \cdot l}{\ln K^2}, \tag{4.3}$$

где

$$K = \frac{a + x - R}{a + R - x};$$

$$x = \frac{S}{2};$$

$$a = \sqrt{(\frac{S}{2})^2 - R^2}\ ;$$

S – расстояние между центрами жил кабеля, м; R – радиус жил кабеля, м; l – длинна кабельной линии, м.

Тангенс угла диэлектрических потерь кабельной бумаги вычисляются по заданным значениям тангенсов углов диэлектрических потерь целлюлозы и воздуха по формуле

$$\mathrm{tg}\delta = \frac{\mathrm{tg}\delta_1}{1+\dfrac{\theta_2 \cdot \xi_{r1}}{(1-\theta_2)\cdot \xi_{r2}}} + \frac{\mathrm{tg}\delta_2}{1+\dfrac{(1-\theta_2)\cdot \xi_{r2}}{\theta_2 \cdot \xi_{r1}}}. \quad (4.4)$$

Удельная активная (γ_a) и удельная реактивная (γ_p) проводимости изоляции в переменном электрическом поле с частотой f вычисляются по формулам, приведённым в основных учебных пособиях.

Удельная полная проводимость изоляции кабеля связана с удельными активной и реактивной проводимостями соотношением

$$\gamma_{из} = \sqrt{\gamma_a^2 + \gamma_p^2} \quad (4.5)$$

Полная проводимость $Y_{из}$ изоляции кабеля определяется по удельной проводимости $\gamma_{из}$ и геометрическим размерам кабеля

$$Y_{из} = \gamma_{из} \cdot \frac{2\pi \cdot l}{\ln K^2} \quad (4.6)$$

Ток утечки кабеля, возникающий под воздействием приложенного напряжения, сопротивление изоляции между жилами в двухжильных кабелях рассчитываются на основании соотношений

$$I_у = U \cdot Y_{из}; \quad (4.7)$$

$$Z_{из} = \frac{1}{Y_{из}}. \quad (4.8)$$

Диэлектрические потери в изоляции кабеля P находятся по действующему значению приложенного переменного напряжения, ёмкости кабельной лини, тангенсу угла диэлектрических потерь и частоте питающей сети

$$P = U^2 \cdot 2\pi \cdot f \cdot C_k \cdot \mathrm{tg}\delta, \quad (4.9)$$

где U – рабочее напряжение кабельной линии, В; f – частота, Гц; C_k – ёмкость кабельной линии, Ф; tgδ – тангенс угла диэлектрических потерь; P – диэлектрические потери, Вт.

Для упрощения расчёта величины пробивного напряжения делаем допущение, что электрическое поле внутри кабеля однородное, то есть напряженность поля в любой его точке одинакова. Тогда электрическая прочность кабельной бумаги может быть получена по заданным значениям электрической прочности компонентов (целлюлозы и воздуха) из следующего уравнения

$$E_{\text{пр}} = \frac{E_{\text{пр1}} \cdot E_{\text{пр2}}}{E_{\text{пр1}} + E_{\text{пр2}} \cdot (1 - \frac{\xi_{r2}}{\xi_{r1}})}. \quad (4.10)$$

Пробивное напряжение изоляции:

$$U_{\text{пр}} = E_{\text{пр}} \cdot h_{\text{из}}, \quad (4.11)$$

где $h_{\text{из}}$ – минимальная толщина изоляции, мм.

Минимальная толщина изоляции между жилами кабеля для двухжильного кабеля определяется из уравнения

$$h_{\text{из}} = S - 2R \quad (4.12)$$

Вычислив электрические параметры линии, в кабеле которой в качестве изоляции использована непропитанная кабельная бумага, следует произвести расчёт параметров этой линии при условии, что оболочка кабеля заполнена вместо воздуха либо газообразным диэлектриком, либо жидким изоляционным материалом. При этом считаем, что в порах капиллярах воздух полностью замещается этими диэлектриками.

Последовательность расчёта остаётся той же, что для непропитанной кабельной бумаги. В уравнениях (4.2), (4.4) и (4.10) необходимо вместо электрических параметров воздуха подставлять аналогичные параметры замещающего воздух другого диэлектрика согласно условию задачи. При записи расчётного уравнения необходимо индекс 2, обозначающий, что это параметр воздуха, изменить на индекс 3.

Например, при определении $\text{tg}\delta_n$ пропитанной жидким диэлектриком кабельной бумаги уравнение (4.4) нужно записать в следующем виде:

$$\text{tg}\delta_{\text{п}} = \frac{\text{tg}\delta_q}{1 + \frac{\theta_3 \cdot \xi_{r1}}{(1-\theta_3) \cdot \xi_{r2}}} + \frac{\text{tg}\delta_3}{1 + \frac{(1-\theta_3) \cdot \xi_{r3}}{\theta_3 \cdot \xi_{r1}}}.$$

При расчёте следует полагать, что объёмные концентрации целлюлозы и заменяющего воздух другого газообразного или жидкого диэлектрика остались такими же, как целлюлозы и воздуха, то есть

$$\theta_3 = \theta_2.$$

После окончания расчёта следует *обязательно* проанализировать, как влияет на электрические параметры кабельной линии пропитка её изоляции жидким диэлектриком. Для удобства анализа необходимо составить таблицу расчётных значений электрических параметров кабельной линии дои после пропитки. Образец такой таблицы представлен ниже.

Таблица 4.2

Таблица сравнительных данных кабельной линии

Обозначение параметра	ξ_r	C_k, Ф	$X_{из}$, См/м	$Z_{из}$, Ом	$Y_{из}$, См	P, Вт	$U_{пр}$, кВ
Кабель без пропитки							
Кабель с пропиткой							

При анализе необходимо указывать, как влияет пропитка изоляции на значение каждого из рассчитанных параметров с использованием теоретических сведений.

В конце анализа необходимо сделать вывод о соответствии изоляции пропитанного и непропитанного кабелей требованиям, предъявляемых к кабельной линии правилами устройства электроустановок (ПУЭ).

В соответствии с этими требованиями кабельные линии с рабочим напряжением до 1000 В должны обладать сопротивлением изоляции $R_{из}$>0,5 МОм при прозвонке их мегаомметром на напряжение 2,5 кВ.

Изоляция кабельных линий с рабочим напряжением более 1 кВ должна выдерживать воздействия постоянных напряжений, значение которых приводятся в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Испытательное напряжение выпрямленного тока для силовых кабелей

Изоляция	Напряжение, кВ, для кабелей на рабочее напряжение, кВ								Продолжительность
	2	3	6	10	20	35	110	220	
Бумажная	12	18	36	60	100	175	300	450	

Для установления соответствия изоляции кабельных линий с рабочим напряжением до 1 кВ требованиям ПУЭ необходимо рассчитать сопротивление изоляции $R_{из}$ постоянному току. Расчёт $R_{из}$ осуществляется по активной удельной проводимости в соответствии с уравнениями

$$g_{из} = \gamma_а \cdot \frac{2\pi \cdot l}{\ln K^2}; \quad (4.13)$$

$$R_{из} = \frac{1}{g_{из}}, \quad (4.14)$$

где $g_{из}$ – активная проводимость кабельной линии, См; $\gamma_а$ – удельная активная проводимость кабельной линии, См/м; $R_{из}$ – сопротивление изоляции постоянному току, Ом.

Если рассчитанное значение сопротивления изоляции $R_{из}$ больше 0,5 мОм, то кабельная линия удовлетворяет требованиям ПУЭ.

Для кабельных линий с рабочим напряжением свыше 1000В проверка изоляции на соответствие требованиям ПУЭ производится путём сравнения

рассчитанного пробивного напряжения с $U_{пр}$ с испытательным напряжением, приведённым в табл. 4.3.

4.4. Экзаменационные вопросы

1. Понятия об электротехнических материалах. Классификация (определения).
2. Диэлектрики. Основные понятия. Определения. Классификация.
3. Понятия поляризации. Механизм поляризации.
4. Виды поляризации. Электронная поляризация.
5. Виды поляризации. Ионная поляризация.
6. Виды поляризации. Спонтанная (остаточная) поляризация.
7. Обобщенная схема замещения диэлектрика.
8. Относительная диэлектрическая проницаемость газообразных диэлектриков.
9. Относительная диэлектрическая проницаемость твердых диэлектриков
10. Относительная диэлектрическая проницаемость сложных диэлектриков. Уравнение Лихтеннекера.
11. Понятия об электропроводности диэлектриков. Электропроводность твердых диэлектриков. Объемное и поверхностное удельные сопротивления диэлектриков.
12. Диэлектрические потери. Основные понятия. Схемы замещения. Виды диэлектрических потерь.
13. Понятие пробоя диэлектриков. Электрический пробой газообразных диэлектриков.
14. Понятие электрического пробоя диэлектриков. Электротепловой пробой.
15. Механические, физические и тепловые свойства диэлектриков.
16. Электроизоляционные материалы. Газообразные, жидкие твердые и твердеющие изоляционные материалы.
17. Физика магнетизма. Условия возникновения ферромагнетизма.
18. Основные характеристики магнитных веществ.
19. Строение ферромагнетиков.
20. Явление магнитной анизотропии и магнитострикции.
21. Намагничивание ферромагнетиков.
22. Свойства ферромагнетиков в квазипостоянных магнитных полях.
23. Динамическая петля намагничивания.
24. Эффект вытеснения магнитного поля диэлектрика в переменном магнитном поле.
25. Потери мощности на перемагничивание ферромагнетиков в переменном магнитном поле.
26. Магнитные материалы. Магнитомягкие и магнитотвердые магнитные материалы.
27. Исследование ферромагнетика в переменном магнитном поле.

28. Полупроводники. Основные понятия. Классификация.
29. Электропроводность полупроводников.
30. Электронно-дырочный переход полупроводников.
31. Проводники. Классификация. Основные понятия.
32. Удельное сопротивление проводников. Температурный коэффициент удельного сопротивления.
33. ТермоЭДС. Температурный коэффициент линейного расширения металлических проводников.
34. Основы конструкционного и электротехнического материаловедение.
35. Агрегатные состояния и дефекты строения материалов.
36. Термическая обработка.
37. Металлы и сплавы.
38. Искусственные и синтетические материалы.
39. Классификация материалов.
40. Технологии получения материалов.

Учебно-методические материалы

Основная литература

Богородицкий Н. П., Пасынков В. В., Тареев Б. М. Электротехнические материалы. 7-е издание. Л.: Энергоатомиздат, 1985. 304 с.

Угольников А. В. Электротехническое и конструкционное материаловедение. Екатеринбург, Изд-во УГГУ, 2015. 147 с.

Хахин Ю. М. Электротехническое материаловедение. Екатеринбург, Изд. УГГГА, 1995. 100 с.

Дополнительная литература

Справочник по электрическим материалам / под ред. Ю. В. Корицкого 2-е изд. М.: Энергия, том 1, 1974. 583 с.; том 2, 1974. 615 с; том 3, 1976. 896 с.

Агеева Н. Д., Винаковская Н. Г, Лифанов В. Н. Электротехническое материаловедение, Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2006. 76 с.

Дудкин А. Н. Ким В. С. Электротехническое материаловедение. Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2012. 216 с.

Журавлева Л. В. Электроматериаловедение, М ПрофОбрИздат, 2001. 312 с.

Попов В. С. Теоретическая электротехника. М.: Энергоатомиздат, 1990.

Розенблат М. А. Магнитные элементы автоматики и вычислительной техники. М.: Наука, 1966. 720с.

Тареев Б. М. Физика диэлектрических материалов. М.: Энергия, 1982. 320 с.

Штофа Ян. Электротехнические материалы в вопросах и ответах. М.: Энергоатомиздат, 1984. 200 с.

Электротехнические и конструкционные материалы. В. Н. Бородулин, А. С. Воробьев, В. М. Матюгин и др. М: Издательский центр «Академия», 2005. 280 с.

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Специальность

21.05.03 Технология геологической разведки

Специализация

Геофизические методы поиска и разведки месторождений полезных ископаемых

Екатеринбург

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 3
ВИДЫ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТА 4
МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ КО ВСЕМ ВИДАМ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ 4
Повторение материала лекций и самостоятельное изучение курса 4
Подготовка к практическим занятиям и лабораторным работам 5
Подготовка и написание контрольной работы 6
Подготовка к выполнению и написанию курсовой работы (проекта) 7
МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ К ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ 8
Подготовка к зачёту 8
Подготовка к экзамену 8

ВВЕДЕНИЕ

Самостоятельная работа студентов – это разнообразные виды деятельности студентов, осуществляемые под руководством, но без непосредственного участия преподавателя в аудиторное и/или внеаудиторное время.

Это особая форма обучения по заданиям преподавателя, выполнение которых требует активной мыслительной, поисково-исследовательской и аналитической деятельности.

Методологическую основу самостоятельной работы студентов составляет деятельностный подход, когда цели обучения ориентированы на формирование умений решать типовые и нетиповые задачи, то есть на реальные ситуации, где студентам надо проявить знание конкретной дисциплины, использовать внутрипредметные и межпредметные связи.

Цель самостоятельной работы – закрепление знаний, полученных на аудиторных занятиях, формирование способности принимать на себя ответственность, решать проблему, находить конструктивные выходы из сложных ситуаций, развивать творческие способности, приобретение навыка организовывать своё время

Кроме того самостоятельная работа направлена на обучение студента осмысленно и самостоятельно работать сначала с учебным материалом, затем с научной информацией, заложить основы самоорганизации и самовоспитания с тем, чтобы привить умение в дальнейшем непрерывно повышать свой профессиональный уровень.

Самостоятельная работа реализует следующие задачи:

- систематизация и закрепление полученных теоретических знаний и практических умений студентов;
- углубление и расширение теоретических знаний;
- формирование умений использовать нормативную, правовую, справочную документацию и специальную литературу;
- развитие познавательных способностей и активности студентов: творческой инициативы, самостоятельности, ответственности и организованности;
- формирование самостоятельности мышления, способностей к саморазвитию, самосовершенствованию и самореализации;
- формирование практических (общеучебных и профессиональных) умений и навыков;
- развитие исследовательских умений;
- получение навыков эффективной самостоятельной профессиональной (практической и научно-теоретической) деятельности.

В учебном процессе выделяют два вида самостоятельной работы:

- аудиторная;
- внеаудиторная.

Аудиторная самостоятельная работа по дисциплине выполняется на учебных занятиях под непосредственным руководством преподавателя и по его заданию.

Внеаудиторная самостоятельная работа – планируемая учебная, учебно-исследовательская, научно-исследовательская работа студентов, выполняемая во внеаудиторное время по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия.

Самостоятельная работа, не предусмотренная образовательной программой, учебным планом и учебно-методическими материалами, раскрывающими и конкретизирующими их содержание, осуществляется студентами инициативно, с целью реализации собственных учебных и научных интересов.

Для более эффективного выполнения самостоятельной работы по дисциплине преподаватель рекомендует студентам источники и учебно-методические пособия для работы, характеризует наиболее рациональную методику самостоятельной работы, демонстрирует ранее выполненные студентами работы и т. п.

ВИДЫ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТА

Основные формы организации самостоятельной работы студентов определяются следующими параметрами:

- содержание учебной дисциплины;
- уровень образования и степень подготовленности студентов;
- необходимость упорядочения нагрузки студентов при самостоятельной работе.

В соответствии с реализацией рабочей программы дисциплины в рамках самостоятельной работы студенту необходимо выполнить следующие виды работ:

для подготовки ко всем видам текущего контроля:

- повторение материала лекций;
- самостоятельное изучение курса;
- подготовка к практическим занятиям и лабораторным работам;
- подготовка к контрольной работе, написание контрольной работы;
- выполнение и написание курсовой работы (проекта);

для подготовки ко всем видам промежуточной аттестации:

- подготовка к зачёту;
- подготовка к экзамену.

Особенностью организации самостоятельной работы студентов является необходимость не только подготовиться к сдаче зачета /экзамена, но и собрать, обобщить, систематизировать, проанализировать информацию по темам дисциплины.

Технология организации самостоятельной работы студентов включает использование информационных и материально-технических ресурсов образовательного учреждения.

Самостоятельная работа может осуществляться индивидуально или группами студентов как online, так и на занятиях в зависимости от цели, объема, конкретной тематики самостоятельной работы, уровня сложности, уровня умений студентов.

В качестве форм и методов контроля внеаудиторной самостоятельной работы студентов могут быть использованы обмен информационными файлами, семинарские занятия, тестирование, опрос, доклад, реферат, самоотчеты, контрольные работы, защита контрольных и курсовых работ (проектов), защита зачётных работ в виде доклада с презентацией и др.

Текущий контроль результатов внеаудиторной самостоятельной работы студентов осуществляется в пределах времени, отведенного на обязательные учебные занятия по дисциплине.

Промежуточный контроль результатов внеаудиторной самостоятельной работы студентов осуществляется в пределах времени, отведенного для сдачи экзамена / зачёта.

В методических указаниях по каждому виду контроля представлены материалы для самостоятельной работы и рекомендации по организации отдельных её видов.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ КО ВСЕМ ВИДАМ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ

Повторение материала лекций и самостоятельное изучение курса

Лекционный материал по дисциплине излагается в виде устных лекций преподавателя во время аудиторных занятий. Самостоятельная работа студента во время лекционных аудиторных занятий заключается в ведении записей (конспекта лекций).

Конспект лекций, выполняемый во время аудиторных занятий, дополняется студентом при самостоятельном внеаудиторном изучении некоторых тем курса. Самостоятельное изучение тем курса осуществляется на основе списка основной и дополнительной литературы к дисциплине.

Перечень основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины приведён в рабочей программе дисциплины.

Рекомендуемые задания для самостоятельной внеаудиторной работы студента, направленные на повторение материала лекций и самостоятельное изучение тем курса:

для овладения знаниями:

- конспектирование текста;
- чтение основной и дополнительной литературы;
- составление плана текста;
- работа со словарями, справочниками и нормативными документами;
- просмотр обучающих видеозаписей.

для закрепления и систематизации знаний:

- работа с конспектом лекций;
- повторная работа над учебным материалом;
- составление таблиц для систематизации учебного материала;
- изучение нормативных материалов;
- составление плана и тезисов ответа на вопросы для самопроверки;
- ответы на вопросы для самопроверки;
- составление библиографических списков по изучаемым темам.

для формирования навыков и умений:

- выполнение рисунков, схем, эскизов оборудования;
- рефлексивный анализ профессиональных умений.

Тематический план изучения дисциплины и содержание учебной дисциплины приведены в рабочей программе дисциплины.

Вопросы для самопроверки приведены учебной литературе по дисциплине или могут быть предложены преподавателем на лекционных аудиторных занятиях после изучения каждой темы.

Подготовка к практическим занятиям и лабораторным работам

Практические занятия по дисциплине выступают средством формирования у студентов системы интегрированных умений и навыков, необходимых для освоения профессиональных компетенций, а также умений определять, разрабатывать и применять оптимальные методы решения профессиональных задач.

На практических занятиях происходит закрепление теоретических знаний, полученных в ходе лекций, осваиваются методики и алгоритмы решения типовых задач по образцу и вариантных задач, разбираются примеры применения теоретических знаний для практического использования, выполняются доклады с презентацией по определенным учебно-практическим, учебно-исследовательским или научным темам с последующим их обсуждением.

Рекомендуемые задания для самостоятельной внеаудиторной работы студента, направленные на подготовку к практическим занятиям:

для овладения знаниями:

- чтение основной и дополнительной литературы;
- работа со словарями, справочниками и нормативными документами;
- просмотр обучающих видеозаписей.

для закрепления и систематизации знаний:

- работа с конспектом лекций;
- ответы на вопросы для самопроверки;
- подготовка публичных выступлений;
- составление библиографических списков по изучаемым темам.

для формирования навыков и умений:

- решение задач по образцу и вариативных задач;
- выполнение рисунков, схем, эскизов оборудования;

– рефлексивный анализ профессиональных умений.

Тематический план изучения дисциплины и содержание учебной дисциплины приведены в рабочей программе дисциплины.

Лабораторные занятия по дисциплине выступают средством формирования у студентов навыков работы с использованием лабораторного оборудования, планирования и выполнения экспериментов, оформления отчётной документации по выполнению лабораторных работ.

Рекомендуемые задания для самостоятельной внеаудиторной работы студента, направленные на подготовку к лабораторным занятиям:

для овладения знаниями:

– изучение методик работы с использованием различных видов и типов лабораторного оборудования;
– изучение правил безопасной эксплуатации лабораторного оборудования;
– работа со словарями, справочниками и нормативными документами.

для закрепления и систематизации знаний:

– составление плана проведения эксперимента;
– составление отчётной документации по результатам экспериментирования;
– аналитическая обработка результатов экспериментов.

для формирования навыков и умений:

– выполнение рисунков, схем, эскизов оборудования;
– оформление отчётной документации по выполнению лабораторных работ.

Подготовка и написание контрольной работы

Контрольная работа – индивидуальная деятельность обучающегося по концентрированному выражению накопленного знания, обеспечивает возможность одновременной работы всем обучающимся за фиксированное время по однотипным заданиям, что позволяет преподавателю оценить всех обучающихся. Контрольная работа является средством проверки умений применять полученные знания для решения задач определенного типа по теме или разделу.

Рекомендуемые задания для самостоятельной внеаудиторной работы студента, направленные на подготовку к контрольной работе:

для овладения знаниями:

– чтение основной и дополнительной литературы;
– работа со словарями, справочниками и нормативными документами.

для закрепления и систематизации знаний:

– работа с конспектом лекций;
– ответы на вопросы для самопроверки.

для формирования навыков и умений:

– решение задач по образцу и вариативных задач;
– выполнение рисунков, схем, эскизов оборудования;
– оформление отчётной документации по выполнению контрольной работы.

Контрольная работа может быть выполнена в виде доклада с презентацией.

Доклад с презентацией – это публичное выступление по представлению полученных результатов знаний по определенной учебно-практической, учебно-исследовательской или научной теме.

При подготовке доклада с презентацией обучающийся должен продемонстрировать умение самостоятельного изучения отдельных вопросов, структурирования основных положений рассматриваемых проблем, публичного выступления, позиционирования себя перед коллективом, навыки работы с библиографическими источниками и оформления научных текстов.

В ходе подготовки к докладу с презентацией обучающемуся необходимо:

- выбрать тему и определить цель выступления;
- осуществить сбор материала к выступлению;
- организовать работу с источниками;
- -во время изучения источников следует записывать вопросы, возникающие по мере ознакомления, ключевые слова, мысли, суждения; представлять наглядные примеры из практики;
- сформулировать возможные вопросы по теме доклада, подготовить тезисы ответов на них;
- обработать материал и представить его в виде законченного доклада и презентации.

При выполнении контрольной работы в виде доклада с презентацией самостоятельная работа студента включает в себя:

для овладения знаниями:

- чтение основное и дополнительной литературы по заданной теме доклада;
- составление плана доклада;
- работа со словарями, справочниками и нормативными документами;
- просмотр обучающих видеозаписей по теме доклада

для закрепления и систематизации знаний:

- составление плана и тезисов презентации по теме доклада;
- составление презентации;
- составление библиографического списка по теме доклада;
- подготовка к публичному выступлению;
- составление возможных вопросов по теме доклада и ответов на них.

для формирования навыков и умений:

- публичное выступление;
- выполнение рисунков, схем, эскизов оборудования;
- рефлексивный анализ профессиональных умений.

Варианты контрольных работ и темы докладов приведены в комплекте оценочных средств дисциплины.

Подготовка к выполнению и написанию курсовой работы (проекта)

Курсовая работа (проект) – форма контроля для демонстрации обучающимся умений работать с объектами изучения, критическими источниками, справочной и энциклопедической литературой, логично и грамотно излагать собственные умозаключения и выводы, обосновывать и строить априорную модель изучаемого объекта или процесса, создавать содержательную презентацию выполненной работы.

При выполнении и защите курсовой работы (проекта) оценивается умение самостоятельной работы с объектами изучения, справочной литературой, логично и грамотно излагать собственные умозаключения и выводы, обосновывать выбранную технологическую схему и принятый тип и количество оборудования, создавать содержательную презентацию выполненной работы (пояснительную записку и графический материал).

Рекомендуемые задания для самостоятельной внеаудиторной работы студента, направленные на подготовку к курсовой работе (проекту):

для овладения знаниями:

- чтение основной и дополнительной литературы;
- работа со словарями, справочниками и нормативными документами;
- составление плана выполнения курсовой работы (проекта);
- составление списка использованных источников.

для закрепления и систематизации знаний:

– работа учебно-методическими материалами по выполнению курсовой работы (проекта);
– изучение основных методик расчёта технологических схем, выбора и расчёта оборудования;
– подготовка тезисов ответов на вопросы по тематике курсовой работы (проекта).

для формирования навыков и умений:

– решение задач по образцу и вариативных задач;
– выполнение рисунков, схем, компоновочных чертежей;
– оформление текстовой и графической документации.

Тематика курсовых работ (проектов) приведены в комплекте оценочных средств дисциплины.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ К ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

Подготовка к зачёту

Зачёт по дисциплине может быть проведён в виде теста или включать в себя защиту контрольной работы (доклад с презентацией).

Тест – это система стандартизированных заданий, позволяющая автоматизировать процедуру измерения уровня знаний и умений обучающегося.

При самостоятельной подготовке к зачёту, проводимому в виде теста, студенту необходимо:

– проработать информационный материал (конспект лекций, учебное пособие, учебник) по дисциплине; проконсультироваться с преподавателем по вопросу выбора дополнительной учебной литературы;
– выяснить условия проведения теста: количество вопросов в тесте, продолжительность выполнения теста, систему оценки результатов и т. д.;
– приступая к работе с тестом, нужно внимательно и до конца прочитать вопрос и предлагаемые варианты ответов, выбрать правильные (их может быть несколько), на отдельном листке ответов вписать цифру вопроса и буквы, соответствующие правильным ответам.

В процессе выполнения теста рекомендуется применять несколько подходов в решении заданий. Такая стратегия позволяет максимально гибко оперировать методами решения, находя каждый раз оптимальный вариант. Не нужно тратить слишком много времени на трудный вопрос, а сразу переходить к другим тестовым заданиям, к трудному вопросу можно обратиться в конце. Необходимо оставить время для проверки ответов, чтобы избежать механических ошибок.

Зачёт также может проходить в виде защиты контрольной работы (доклад с презентацией). Методические рекомендации по подготовке и выполнению доклада с презентацией приведены в п. «Подготовка и написание контрольной работы».

Подготовка к экзамену

Промежуточная аттестация по итогам освоения дисциплины проводится в форме экзамена.

Билет на экзамен включает в себя теоретические вопросы и практико-ориентированные задания.

Теоретический вопрос – индивидуальная деятельность обучающегося по концентрированному выражению накопленного знания, обеспечивает возможность одновременной работы всем обучающимся за фиксированное время по однотипным заданиям, что позволяет преподавателю оценить всех обучающихся.

Практико-ориентированное задание – средство проверки умений применять полученные знания для решения задач определенного типа по определенной теме.

При самостоятельной подготовке к экзамену студенту необходимо:

- получить перечень теоретических вопросов к экзамену;
- проработать пройденный материал (конспект лекций, учебное пособие, учебник) по дисциплине, при необходимости изучить дополнительные источники;
- составить планы и тезисы ответов на вопросы;
- проработать все типы практико-ориентированных заданий;
- составить алгоритм решения основных типов задач;
- выяснить условия проведения экзамена: количество теоретических вопросов и практико-ориентированных заданий в экзаменационном билете, продолжительность и форму проведения экзамена (устный или письменный), систему оценки результатов и т. д.;
- приступая к работе с экзаменационным билетом, нужно внимательно прочитать теоретические вопросы и условия практико-ориентированного задания;
- при условии проведения устного экзамена составить план и тезисы ответов на теоретические вопросы, кратко изложить ход решения практико-ориентированного задания;
- при условии проведения письменного экзамена дать полные письменные ответы на теоретические вопросы; изложить ход решения практико-ориентированного задания с численным расчётом искомых величин.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебно-методическому комплексу
_____ С.А. Упоров

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
ПО ФИЗИКЕ ЗЕМЛИ

Специальность:

21.05.03 Технология геологической разведки

форма обучения: очная, заочная

Автор: Болотнова Л. А.,Филатов В. В.

Екатеринбург

2020

Ф 51

Рецензенты: *Д. С. Васшаль*, канд. геол.-минерал. наук, Геофизический отдел Комитета природных ресурсов по Свердловской области;
В. В. Кормильцев, д-р геол.-минерал. наук, профессор, зав. лабораторией электрометрии ИГ УрО РАН

Печатается по решению Редакционно-издательского совета Уральского государственного горного университета

Филатов В. В., Кузин А. В.

Ф 51 ФИЗИКА ЗЕМЛИ: практикум / В. В. Филатов, А. В. Кузин; Урал. гос. горный ун-т. – Изд. 3-е, исправл. и доп. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2017. – 26 с.

Практикум содержит темы, методические указания, формулы, варианты заданий для выполнения практических занятий по дисциплине «Физика Земли». В справочном отделе приведены численные значения основных физических параметров Земли и физических констант, указания по переводу единиц физических величин в Международную систему СИ.

Практикум предназначен для студентов вузов, обучающихся по специальности 21.05.03 – «Технология геологической разведки».

© Филатов В. В., Кузин А. В., 1999
© Филатов В. В., Кузин А. В., 2001
© Филатов В. В., Кузин А. В., 2011
© Уральская государственная горно-геологическая академия, 1999, 2001
© Уральский государственный горный университет, 2011

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ АБСОЛЮТНОГО ВОЗРАСТА ГОРНЫХ ПОРОД

Содержание работы: по результатам определения изотопов свинца Pb^{204}, Pb^{206}, Pb^{207}, Pb^{208} в горных породах различных месторождений вычислить абсолютный возраст этих пород.

Расчетные формулы:

$$\frac{Pb^{206}}{Pb^{204}} = 18{,}90 - 12{,}00\left(e^{0{,}155t} - 1\right); \qquad (1.1)$$

$$\frac{Pb^{207}}{Pb^{204}} = 15{,}98 - 0{,}086\left(e^{0{,}972t} - 1\right); \qquad (1.2)$$

$$\frac{Pb^{208}}{Pb^{204}} = 38{,}82 - 37{,}00\left(e^{0{,}049t} - 1\right). \qquad (1.3)$$

Пример задания исходных данных и оформления результатов расчетов дан в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Содержание изотопов свинца, возраст абразцов горных пород

Месторождение	Изотопный состав свинца			Возраст по трем изотопным отношениям, млрд лет	Среднее значение возраста, млрд лет
	Pb^{206}	Pb^{207}	Pb^{208}		
Рудник Садбери	16,20	15,36	36,99		
Рудник Садбери	16,15	15,60	35,94		
Юго, Швеция	15,92	15,61	35,89		
Корске, Финляндия	15,95	15,57	36,26		
Перяаки, Финляндия	15,85	15,51	36,00		
Сандала, Карелия	14,88	14,91	33,31		
Шиккеранта, Карелия	14,26	14,77	33,23		
Кемь, Карелия	15,43	14,87	34,50		
Сала, Швеция	15,40	14,95	34,00		

Примечание. Содержание Pb^{204} равно 1, варианты исходных заданий приведены в главе 10.

Задание

1. Преобразовать формулы (1.1)–(1.3) к виду, позволяющему определить время *t*.

2. Провести расчеты абсолютного возраста для каждого образца по трем преобразованным формулам (1.1)–(1.3).

3. Рассчитать среднее значение возраста каждого образца по трем определениям (резко отличающиеся значения возраста при расчете среднего значения следует отбросить, так как отдельные изотопы могли быть привнесены или вынесены из горных пород при метасоматозе и других геологических явлениях).

2. ВЫЧИСЛЕНИЕ НОРМАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ УСКОРЕНИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Содержание работы: по формуле Гельмерта 1884 г. и одной из формул (2)–(15) вычислить нормальное значение ускорения силы тяжести в зависимости от ширины точки на поверхности Земли в интервале широт от 90° (полюс) до 0° (экватор). Шаг измерения широты $\Delta\varphi = 10°$. Величину долготы (при расчетах по некоторым формулам) принять 60°. По результатам расчетов построить графики (рис. 2.1).

Расчетные формулы:

1. Гельмерт, 1884 г.
$$\gamma_0 = 978{,}00\left(1 + 0{,}005310\sin^2\varphi\right);$$
2. Гельмерт, 1901–1909 гг.
$$\gamma_0 = 978{,}030\left(1 + 0{,}005302\sin^2\varphi - 0{,}000007\sin^2\varphi\right);$$
3. Гельмерт, 1915 г.
$$\gamma_0 = 978{,}052\left[1 + 0{,}005285\sin^2\varphi - 0{,}000007\sin^2\varphi + 0{,}000018\cos^2\varphi\cos 2\left(\lambda + 17°\right)\right];$$
4. Боуи, 1917 г.
$$\gamma_0 = 978{,}039\left(1 + 0{,}005294\sin^2\varphi - 0{,}000007\sin^2 2\varphi\right);$$

5. Гейсканен, 1924 г.
$$\gamma_0 = 978{,}052\left[1 + 0{,}005285\sin^2\varphi - 0{,}000007\sin^2 2\varphi + 0{,}000027\cos^2\varphi\cos 2\left(\lambda + 18°\right)\right];$$
6. Гейсканен, 1928 г.
$$\gamma_0 = 978{,}049\left[1 + 0{,}005293\sin^2\varphi - 0{,}000007\sin^2 2\varphi + 0{,}000019\cos^2\varphi\cos 2\left(\lambda + 0°\right)\right];$$
7. Гейсканен, 1928 г.
$$\gamma_0 = 978{,}049\left(1 + 0{,}005289\sin^2\varphi - 0{,}000007\sin^2 2\varphi\right);$$
8. Кассинис, 1930 г.
$$\gamma_0 = 978{,}049\left(1 + 0{,}0052884\sin^2\varphi - 0{,}0000059\sin^2 2\varphi\right);$$
9. Гейсканен, 1938 г.
$$\gamma_0 = 978{,}0524\left[1 + 0{,}0052970\sin^2\varphi - 0{,}0000059\sin^2 2\varphi + 0{,}0000276\cos^2\varphi\cos 2\left(\lambda + 25°\right)\right];$$
10. Жонглович, 1952 г.
$$\gamma_0 = 978{,}0573\left(1 + 0{,}0052837\sin^2\varphi - 0{,}0000059\sin^2 2\varphi\right);$$
11. Жонглович, 1952 г.
$$\gamma_0 = 978{,}0573\left[1 + 0{,}005268\sin^2\varphi - 0{,}0000059\sin^2 2\varphi + 0{,}0000155\cos^2\varphi\cos 2\left(\lambda + 6°\right)\right];$$
12. Гейсканен, 1957 г.
$$\gamma_0 = 978{,}0497\left(1 + 0{,}0032902\sin^2\varphi - 0{,}0000059\sin^2 2\varphi\right);$$
13. Гейсканен, 1957 г.
$$\gamma_0 = 978{,}0516\left[1 + 0{,}0052910\sin^2\varphi - 0{,}0000059\sin^2 2\varphi + 0{,}0000106\cos^2\varphi\cos 2\left(\lambda + 6°\right)\right];$$
14. Грушинский, 1960 г.
$$\gamma_0 = 978{,}0531\left(1 + 0{,}0052883\sin^2\varphi - 0{,}0000059\sin^2 2\varphi\right);$$
15. Международная формула, 1967 г.
$$\gamma_0 = 978{,}01318\left(1 + 0{,}0053024\sin^2\varphi - 0{,}0000059\sin^2 2\varphi\right).$$

Пример оформления результатов расчетов.

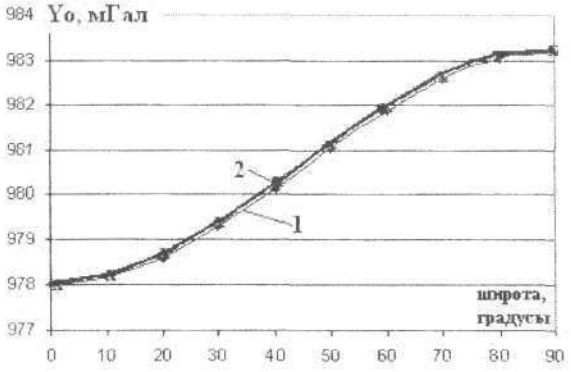


Рис. 2.1. Изменение нормального значения ускорения силы тяжести в зависимости от широты:

1 – формула Гельмерта, 1884 г.; *2* – одна из формул (2)–(15)

3. ИЗМЕРЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Содержание работы: провести измерение ускорения силы тяжести по вертикальному профилю и вычислить нормальное значение вертикального градиента ускорения силы тяжести.

Оборудование: гравиметр типа ГАК, ГНУ-КС, батарея напряжением 3 В, мерная лента (рулетка).

Порядок выполнения работы

1. Место проведения измерений. Измерения выполняют вдоль вертикального профиля, совмещенного с лестничным пролетом. Пункты наблюдения располагаются на площадках первого и четвертого этажей.

2. Методика измерений.

а) установить гравиметр на площадке, провести его горизонтирование с помощью подъемных винтов;

б) подключить батарею к разъемам гравиметра, при этом загорится лампочка подсветки оптической системы, прибор готов к работе;

в) вращая микрометренный винт измерительного устройства, совместить блик в окуляре гравиметра с нулевой линией внутренней шкалы;

г) взять отчет S_i на отсчетном устройстве гравиметра, записать его в журнал;

д) вращением измерительного винта (влево или вправо, но всегда в одну сторону) отвести блик и снова совместить его с нулевой линией, взять новый отсчет. Должно быть взято пять отсчетов на каждой точке измерения. Исключить из отсчетов наибольший и наименьший, по оставшимся трем рассчитать среднее значение.

3. Схема измерений. Измерения относительного изменения ускорения силы тяжести на двух площадках, расположенных на различной высоте, выполняют по цикловой схеме (рис. 3.1). Цикловая схема измерений предусматривает взятие отсчета S_1 на площадке I, переход на площадку II, взятие отсчета S_2, возвращение на площадку I, взятие отсчета S'_1.

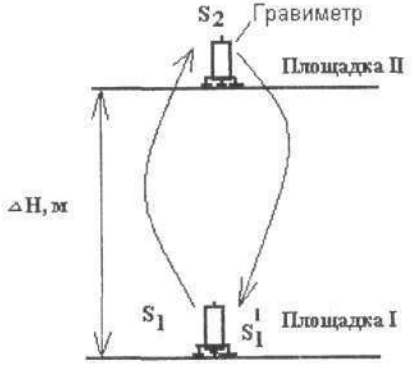


Рис. 3.1. Схема измерений ускорения силы тяжести и ее вертикального градиента

4. Расчет относительного изменения силы тяжести между двумя площадками проводят по формуле

$$\Delta g = C\left[S_2 - \frac{1}{2}(S_1 + S_1')\right], \qquad (3.1)$$

где C – цена деления гравиметра.

5. Мерной лентой измеряют разность высот ΔH между площадками.

6. Вычисляют вертикальный градиент ускорения силы тяжести (мГал/м):

$$g(H) = \frac{\Delta g}{\Delta H} \qquad (3.2)$$

и сравнивают его с теоретическим значением 0,3086 мГал/м.

4. ПОСТРОЕНИЕ ГОДОГРАФОВ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН

Содержание работы:

– выполнить корреляцию (с помощью преподавателя) на учебной сейсмограмме фаз прямой и преломленной волн;

– построить на миллиметровой бумаге годографы волн: прямой ($\Gamma_{пр}$), преломленной ($\Gamma_{гол}$) (рис. 4.1);

– рассчитать скорость волн по годографам (см. рис. 4.1).

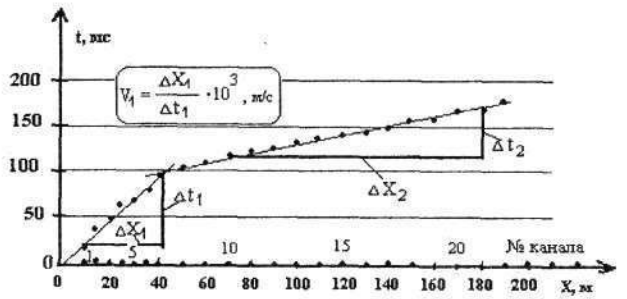


Рис. 4.1. Годографы прямой и преломленной волн

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ЭПИЦЕНТРА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Содержание работы: зная координаты планового положения сейсмических станций (рис. 5.1) и время регистрации продольных T_p и поперечных T_s упругих волн от очага землетрясения (табл. 5.1), определить координаты эпицентра землетрясения.

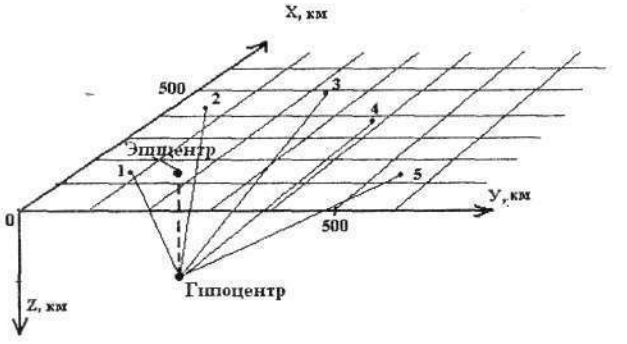


Рис. 5.1. Схема хода лучей упругих волн
от гипоцентра землетрясения к сейсмическим станциям

Таблица 5.1

Координаты станций и время регистрации прихода волн

Сейсмологические станции	Координаты станций, км		Отметка прихода времени волн, с		Разность, с	Абсолютное время, с	
	X	Y	T_p	T_s	$T_s - T_p$	t_p	t_s
1	800	200	70,28	109,77			
2	1000	900	99,98	160,68			
3	1100	400	85,72	136,23			
4	400	100	99,98	160,68			
5	200	300	106,28	171,48			

$V_p = 6$ км/с, $V_s = 3{,}5$ км/с.

Порядок выполнения работы

Построить график Вадати (рис. 5.2) и определить по нему время, когда произошло землетрясение (t_o).

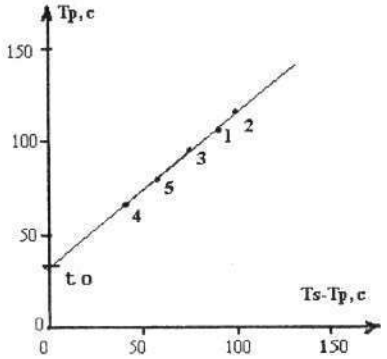


Рис. 5.2. График Вадати

2. Вычислить время распространения продольной и поперечной волн от очага землетрясения до сейсмических станций по формулам:

$$t_p = T_p - t_o; \quad (5.1)$$

$$t_s = T_s - t_o. \quad (5.2)$$

По формулам (5.3) и (5.4) определить координаты эпицентра землетрясения:

$$x_0 = \frac{B_2 D_1 - B_1 D_2}{A_1 B_2 - B_1^2}; \quad (5.3)$$

$$y_0 = \frac{A_1 D_2 - B_1 D_1}{A_1 B_2 - B_1^2}, \quad (5.4)$$

где A_1, B_1, B_2, D_1, D_2 – коэффициенты, определяемые по формулам:

$$A_1 = \sum_{i=2}^{5}\left[2(x_1 - x_i)\right]^2; \quad B_1 = \sum_{i=2}^{5}\left[2(x_1 - x_i)\right]\left[2(y_1 - y_i)\right]; \quad B_2 = \sum_{i=2}^{5}\left[2(y_1 - y_i)\right]^2;$$

$$D_1 = \sum_{i=2}^{5}\left\{2(x_1 - x_i)\left[\left(x_1^2 - x_i^2\right) + \left(y_1^2 - y_i^2\right) + V_p^2\left(t_{pi}^2 - t_{p1}^2\right)\right]\right\};$$

$$D_2 = \sum_{i=2}^{5}\left\{2(y_1 - y_i)\left[\left(x_1^2 - x_i^2\right) + \left(y_1^2 - y_i^2\right) + V_p^2\left(t_{pi}^2 - t_{p1}^2\right)\right]\right\}.$$

4. Построить на миллиметровой бумаге схему расположения сейсмических станций и показать на ней положение эпицентра землетрясения.

6. ВЫЧИСЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ТЕМПЕРАТУРНОГО ГРАДИЕНТА ДЛЯ МОДЕЛИ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Содержание работы:

1. Рассчитать теоретические значения среднего температурного градиента (G) по данным табл. 6.1:

$$G = \left(\frac{A}{\lambda}\right)H. \quad (6.1)$$

Таблица 6.1

Значения удельной объемной теплогенерации и коэффициента теплопроводности для модели земной коры

Теплогенерация $A \cdot 10^{-7}$, Вт/м^3	Теплопроводность λ, Вт/(м·°С)
7,5	1,9–3,2
7,6	2,6–3,5
8,9	2,1–2,3

2. Рассчитать кривые теоретических температур T в земной коре по формуле:

$$T = T_o + \frac{A}{3\lambda}\left[\frac{1}{2}\left(R_3^2 - R^2\right) - \left(R_3 - H\right)^3 \frac{R_3 - R}{R_3 R}\right], \quad (6.2)$$

где T_o = 0 °С – температура на поверхности Земли; R_3 – радиус земного шара, 6371 км; R – расстояние от центра Земли до произвольной точки внутри земной коры, R изменяется от 6369 до 6331 км с шагом 2 км; H = 40 км – мощность коры.

3. Построить график изменения температуры для модели земной коры (рис. 6.1).

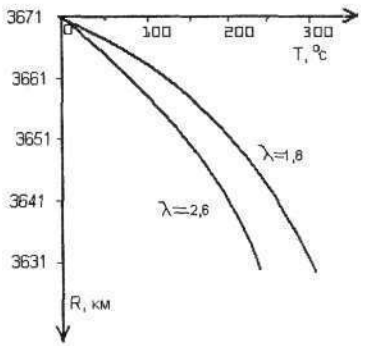


Рис. 6.1. Графики температуры для модели земной коры

7. ИЗМЕРЕНИЕ ВАРИАЦИЙ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Содержание работы: провести измерение вариаций вертикальной составляющей магнитной индукции (*z*-составляющей) геомагнитного поля в течение 5 минут с интервалом времени 5-10 с путем снятия отсчетов по шкале оптико-механического магнитометра типа М-27. Результаты измерений и вычислений записать в специальный журнал.

Обработка результатов:

1. Значения отсчетов магнитометра умножить на цену деления (10 нТл/деление), записать в соответствующую колонку таблицы.

2. Построить вариограмму (рис. 7.1).

3. Определить амплитуду изменения значений магнитной индукции за время наблюдения.

4. Оценить интенсивность вариаций в баллах (табл. 7.1).



Рис. 7.1. Вариограмма значений вертикальной составляющей магнитного поля (время местное)

Таблица 7.1

Шкала балльности вариаций магнитного поля

Амплитуда изменения индукции магнитного поля, нТл	0–5,5	11	22	44	77	132	220	363	550	>550
Баллы	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Оценка	Норма			Возмущение		Буря				

8. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ГРАВИТАЦИОННЫХ И РОТАЦИОННЫХ СИЛ ЗЕМЛИ

1. Определить величину ускорения силы тяжести на полюсах Земли в единицах СИ, в миллигалах, по формуле

$$g = \frac{kM_3}{R^2}, \qquad (8.1)$$

где k – гравитационная постоянная; M_3 – масса Земли; R – полярный радиус Земли (см. эти и прочие параметры в главе 11).

Рассчитать силу гравитационного притяжения единичной массы (1 кг).

2. Рассчитать центробежную силу, действующую на физическое тело, расположенное на: а) экваторе Земли, б) на широте

56°. Определить центробежное ускорение, действующее на единичную массу данного тела, перевести значение ускорения в миллигалы по формулам:

$$F_{цб} = m\omega^2 R = m\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 R, \quad (8.2)$$

$$C = \frac{F_{цб}}{m}. \quad (8.3)$$

3. Определить соотношение силы притяжения и центробежной силы, действующих на единичную массу, расположенную: а) на экваторе Земли на широте 30°, по формулам (8.1), (8.3), (8.4)

$$C_{(\varphi)} = \omega^2 R\cos^2\varphi. \quad (8.4)$$

4. Рассчитать линейную скорость материальной точки, расположенной: а) на экваторе Земли, б) на широте 35° по формулам:

$$V = \frac{2\pi}{T}R; \quad (8.5)$$

$$V = \frac{2\pi}{T}R\cos\varphi. \quad (8.6)$$

5. Определить силу притяжения между Землей и Луной по формуле

$$F = \frac{kM_З M_Л}{R_{ЗЛ}^2}. \quad (8.7)$$

6. Определить линейную скорость движения Земли по орбите вокруг Солнца по формуле

$$V_З = \frac{2\pi}{T_З}R_{С-З}, \quad (8.8)$$

где $T_З$ – время движения Земли по орбите вокруг Солнца, звездный год (в секундах).

9. ОБРАБОТКА ДАННЫХ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ

Содержание работы. При магнитотеллурических зондированиях (МТЗ) регистрируют в течение нескольких часов или суток вариации геомагнитного поля и вариации наведенных (индуцированных) электрических токов в Земле. По соотношению напряженности E электрического и индукции B магнитного полей рассчитывают комплексное сопротивление среды – импеданс $Z = E/H$. По импедансу рассчитывают значения удельного электрического сопротивления ρ_T. Индекс T при сопротивлении означает, что его величина определяется для электромагнитного поля с определенным периодом колебаний T, то есть с различной частотой. Известно, что волны с низкой частотой распространяются на больших глубинах, а с высокой – у поверхности проводника (Земли). Это проявление так называемого «поверхностного эффекта» в распространении электромагнитных волн в проводнике. Выделяя на вариограммах волны различной частоты, можно оценить удельное электрическое сопротивление различных слоев Земли, вплоть до ее ядра.

При построении кривых МТЗ на билогарифмических бланках по одной из осей откладывают ρ_T, а по другой – значения корня квадратного из величины периода электромагнитного колебания (рис. 9.1).

На кривых МТЗ к ее восходящим частям можно провести вспомогательные линии продольной проводимости S, а к нисходящим – линии h мощности слоев высокого поперечного сопротивления. Используя значения квадратного корня из периода колебаний волн, отсекаемых этими линиями по формулам (9.1)–(9.6), можно определить значения продольной проводимости низкоомных слоев и мощности слоев высокого сопротивления:

$$S_1 = 356\sqrt{T_S}; \quad (9.1)$$

$$S_{10} = 114\sqrt{T_S}; \quad (9.2)$$

$$S_{100} = 35{,}6\sqrt{T_S}; \quad (9.3)$$

$$h_1 = 0{,}396\sqrt{T_h}; \quad (9.4)$$

$$h_{10} = 1{,}28\sqrt{T_h}; \quad (9.5)$$

$$h_{100} = 3{,}96\sqrt{T_h}. \quad (9.6)$$

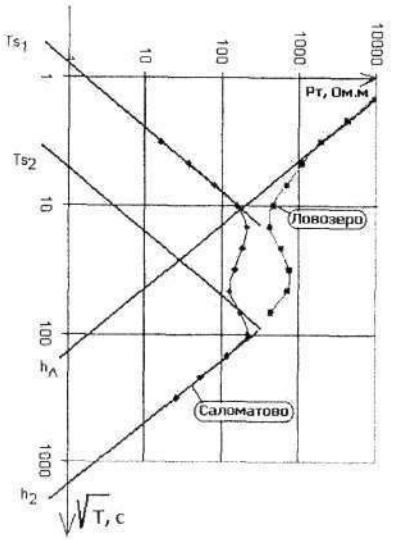


Рис. 9.1. Кривые МТЗ и вспомогательные линии

Индексы 1, 10, 100 означают значение ρ_T на билогарифмическом бланке, через которое проходит ось $\sqrt{T}$, на которой для конкретной кривой МТЗ сняты значения T_S и T_h.

Порядок выполнения работы

1. Построить на билогарифмическом бланке кривую МТЗ.

2. Провести на кривой асимптотические линии продольной проводимости S и мощности слоев высокого поперечного сопротивления h.

3. Снять значения $\sqrt{T_S}$ и $\sqrt{T_h}$ для выделяемых пластов с повышенной продольной проводимостью и повышенным поперечным сопротивлением и по формулам (9.1)–(9.6) рассчитать значения продольной проводимости и мощности слоев высокого поперечного сопротивления.

4. Рассчитать удельное электрическое сопротивление ρ_T верхнего слоя мощностью H = 40 км (40000 м), воспользовавшись формулой: $H = S\rho_T$.

5. Дать геологическое истолкование полученным при обработке кривой МТЗ результатам, то есть оценить мощности выделяемых слоев: коры, глубины до астеносферного слоя, мощности высокоомной мантии, глубины до электропроводного ядра и т. п.

6. Составить краткую пояснительную записку к выполненной работе.

10. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

1. Определение абсолютного возраста горных пород свинцовым методом.

Месторождение	Содержание изотопов свинца		
	Pb^{206}	Pb^{207}	Pb^{208}
1	2	3	4
Задание 1			
Питкеранта, Карелия	14,26	14,77	33,23
Кинов-Кознала, Финляндия	14,27	14,64	32,96
Кинов-Кознала, Финляндия	14,85	14,99	34,44
Беломорье, Карелия	14,97	15,13	35,00
Северная Варака, Карелия	14,76	14,96	35,20
Кемь, Карелия	15,43	14,87	34,50
Сала, Швеция	15,40	14,95	34,00
Орнарви, Финляндия	15,74	15,46	34,04
Орнарви, Финляндия	16,50	15,70	36,80
Задание 2			
Лонгбон, Швеция	15,83	15,45	35,60
Тэдино, Карелия	14,76	14,85	35,17
Юто, Швеция	15,92	15,61	35,89

Продолжение задания 1

Месторождение	Содержание изотопов свинца		
	Pb^{206}	Pb^{207}	Pb^{208}
1	2	3	4
Фалун, Швеция	15,34	14,99	33,84
Фалун, Швеция	15,89	15,66	35,86
Корске, Финляндия	15,95	15,57	36,26
Атту, Финляндия	15,82	15,47	35,89
Айла, Финляндия	15,95	15,64	36,24
Пакили, Финляндия	15,73	15,36	35,30
Задание 3			
Парнайа, Финляндия	15,85	15,51	36,00
Пенийавара, Финляндия	15,74	15,45	35,98
Оутокульту, Финляндия	14,90	15,23	35,21
Ялонвара, Приладожье	14,95	15,04	34,35
Клее 6, Питкеранта	14,72	14,96	33,61
Люппико, Питкеранта	14,66	14,88	33,75
Хонунвара, Питкеранта	14,60	14,86	33,54
Фадейн, Келья	14,90	14,92	33,71
Сондала, Карелия	14,88	14,91	33,31
Задание 4			
Рудник Садбери	16,20	15,76	36,99
То же	16,15	15,60	35,94
Юто, Швеция	15,92	15,61	35,89
Корске, Финляндия	15,95	15,57	36,26
Пернайа, Финляндия	15,85	15,51	36,00
Сондала, Карелия	14,88	14,91	33,31
Питкеранта, Карелия	14,26	14,77	33,23
Кемь, Карелия	15,43	14,87	34,50
Сала, Швеция	15,40	14,95	34,00
Задание 5			
Галениты из Тандер	18,19	15,31	37,78
Бай, Онтарио	18,32	15,25	37,14
Рудник Садбери, Онтарио	16,30	15,49	36,97
То же	16,43	15,69	36,93
– " –	15,99	15,48	36,56
– " –	16,20	15,16	36,99
– " –	16,15	15,60	35,94
– " –	15,94	15,34	36,56
«8-е Марта»	18,02	15,42	37,91

5. Определение координат эпицентра землетрясения

Сейсмологические станции	Координаты станций, км		Отметка времени прихода волн, с	
	X	Y	T_p	T_s
1	2	3	4	5
Задание 1				
1	300	500	78,87	127,80
2	500	200	70,10	113,03
3	1200	300	101,28	166,48
4	1000	600	62,78	100,48
5	700	900	78,87	127,80
Задание 2				
1	200	400	104,98	165,68
2	600	500	43,35	60,40
3	1000	700	82,37	126,91
4	800	300	60,82	89,97
5	1100	100	115,73	184,11
Задание 3				
1	800	200	70,28	109,77
2	1000	900	99,98	160,68
3	1100	400	85,72	136,23
4	400	100	99,98	160,68
5	200	300	106,28	171,48
Задание 4				
1	1000	400	65,28	104,77
2	300	900	105,73	174,11
3	400	400	65,28	104,77
4	700	1000	94,98	155,68
5	200	800	108,60	179,03
Задание 5				
1	500	600	55,82	84,97
2	900	1000	106,28	171,48
3	300	800	99,98	160,68
4	100	400	117,74	191,11
5	1100	500	83,87	12,80
Задание 6				
1	600	400	33,87	54,48
2	900	1000	94,75	158,96
3	100	500	105,00	176,43
4	300	1100	125,18	211,03
5	200	800	102,18	171,60

Продолжение задания 5

1	2	3	4	5
Задание 7				
1	100	400	115,73	189,11
2	400	1200	141,02	232,46
3	1000	600	68,28	107,77
4	1200	700	104,28	169,48
5	300	100	108,73	177,11
Задание 8				
1	1200	900	115,02	192,17
2	800	300	47,82	76,97
3	200	1000	126,02	211,03
4	600	200	62,28	101,77
5	100	700	113,72	189,94
Задание 9				
1	900	900	94,75	158,86
2	1000	400	77,65	129,54
3	800	300	67,36	111,90
4	500	200	83,17	139,01
5	600	600	60,28	99,76
Задание 10				
1	1000	500	80,09	123,01
2	400	400	82,36	126,90
3	300	100	120,08	191,43
4	1000	200	98,07	154,01
5	300	700	101,65	159,97

6. Вычисление температуры (*T*) и геотермического градиента (*G*) для модели земной коры

Задание	Плотность тепловых источников $A \cdot 10^{-7}$, Вт/м^3	Температуропроводность горных пород, Вт/м·°С
1	7,9	2,1–3,1
2	8,0	2,2–2,8
3	8,4	2,1–3,7
4	8,5	3,6–5,3
5	7,9	2,0–3,0
6	8,9	2,1–2,7
7	8,2	1,5–2,2
8	8,3	2,0–2,3
9	8,6	2,5–3,2
10	8,7	1,3–1,8

Продолжение задания 6

Задание	Плотность тепловых источников, $A \cdot 10^{-7}$, Вт/м^3	Температуропроводность горных пород, Вт/м·°С
11	8,0	1,9–3,2
12	8,1	2,6–3,5
13	8,0	1,8–3,1
14	8,1	2,5–3,4
15	8,6	2,6–3,3
16	8,7	1,4–1,9
17	8,2	1,6–2,3
18	8,3	2,1–2,4
19	8,4	2,0–3,8
20	8,5	3,7–5,2

11. СПРАВОЧНЫЙ ОТДЕЛ

Радиоактивные элементы и константы их распада

Элемент	Кларк изотопа, умноженный на относит. содержание изотопа в природной смеси элементов, %	Конечный продкт распада	Постоянная распада λ, 1/лет	Период полураспада, *T*, лет
Уран U_{92}^{238}	$2{,}6 \cdot 10^{-4} \cdot 0{,}993$	Свинец Pb_{82}^{208}	$1{,}53 \cdot 10^{-10}$	$4{,}498 \cdot 10^{9}$
Актиноуран U_{92}^{235}	$2{,}6 \cdot 10^{-4} \cdot 0{,}0073$	Свинец Pb_{82}^{207}	$9{,}722 \cdot 10^{-10}$	$7{,}13 \cdot 10^{8}$
Торий Th_{90}^{232}	$11{,}3 \cdot 10^{-4} \cdot 1$	Свинец Pb_{82}^{208}	$4{,}931 \cdot 10^{-11}$	$1{,}39 \cdot 10^{10}$
Рубидий Rb_{37}^{87}	0,009·0,272	Стронций Sr_{38}^{87}	$1{,}39 \cdot 10^{-11}$ $1{,}47 \cdot 10^{-11}$	$5{,}0 \cdot 10^{10}$ $4{,}7 \cdot 10^{10}$
Самарий Sm_{62}^{146}	$7 \cdot 10^{-4} \cdot 0{,}149$	Неодим Nd_{60}^{143}	$6{,}6 \cdot 10^{-12}$	$1{,}05 \cdot 10^{10}$
Неодим Nd_{60}^{150}	$3{,}2 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}056$	Прометий Pm_{61}^{150}	$6{,}9 \cdot 10^{-17}$	$1 \cdot 10^{16}$
Радиоуглерод C_{6}^{14}		Азот N_{7}^{14}	$1{,}245 \cdot 10^{-4}$	5568

Некоторые параметры и законы Солнечной системы

Масса Солнца $M_С = 1{,}991 \cdot 10^{30}$ кг.
Масса Земли $M_З = 5{,}976 \cdot 10^{24}$ кг.
Масса Луны $M_Л = 7{,}17 \cdot 10^{22}$ кг.
Расстояние от Земли до Солнца $150 \cdot 10^6$ км.
Расстояние от Земли до Луны 388400 км.
Экваториальный радиус Земли $R_э = 6378{,}16$ км.
Полярный радиус Земли $R_п = 6356{,}18$ км.
Сжатие Земли $e = (R_э - R_п)/R_э = 1/298{,}25$.
Гравитационная постоянная $K = 6{,}67 \cdot 10^{-11}$ м^3/кг·с^2.
Сила гравитационного притяжения Землей массы m:

$$F = K\frac{mM_З}{R^2}.$$

Центробежная сила, действующая на массу m:

$$F_ц = m\omega^2 r = m\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 r,$$

где T – период вращения; r – радиус вращения.
Звездный год Земли $T_З = 365$ сут. 6 ч. 9 мин. 10 с = 31558150 с.

Перевод внесистемных единиц в единицы СИ

Параметр	Единица измерения	Перевод единицы в СИ
Длина	ангстрем	$1 \cdot 10^{-10}$ м
Объем	литр	$1 \cdot 10^{-3}$ м
Давление	Атмосфера мм рт. ст. бар 760 мм рт. ст.	101325 Па 103,322 Па $1 \cdot 10^5$ Па 101325 Па
Мощность	Лошадиная сила	735,499 Вт
Удельная теплоемкость	кал/(г·К°)	$4{,}1868 \cdot 10^3$ Дж/(г·К°)
Количество теплоты	кал	4,1686 Дж
Удельное количество теплоты	кал/г	$4{,}1868 \cdot 10^3$ Дж/кг
Тепловой поток	кал/с	4,1868 Вт
Теплопроводность	кал/(с·см·К°)	$4{,}1868 \cdot 10^2$ Вт/(м·К°)
Коэффициент лучеиспускания	кал/(с·см^2·К°)	$4{,}1868 \cdot 10^4$ Вт/(м^2·К°)
Газовая постоянная	кал/(г·К°)	$4{,}1868 \cdot 10^3$ Дж/(г·К°)

Перевод различных единиц в метрическую систему

Параметр	Единица измерения	Метрическая система
Длина	1 дюйм 1 фут 1 миля 1 морская миля	2,54 см 30,3 см 1,61 км 1,85 км
Объем	1 л	10^3 см^3
Масса	1 кг	10^3 г
Скорость	1 км/ч	27,8 см/с
Ускорение	1 гал	1 см/с^2
Давление	1 бар 1 атм	10^6 дин/см^2 $1013 \cdot 10^3$ дин/см^2
Энергия	1 Дж	10^7 эрг

Соотношение единиц температуры в различных системах

По Цельсию, °С	По Кельвину, К	По Фаренгейту, F
0	273,2	32
10	283,2	50
20	293,2	68
30	303,2	86
40	313,02	104
100	373,02	212
-40	233,02	-40

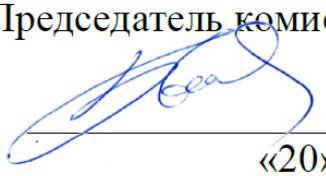
ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Определение абсолютного возраста горных пород 3
2. Вычисление нормального значения ускорения силы тяжести ... 4
3. Измерение ускорения силы тяжести 6
4. Построение годографов сейсмических волн 8
5. Определение координат эпицентра землетрясения 9
6. Вычисление температуры и температурного градиента для модели земной коры 11
7. Измерение вариаций геомагнитного поля 12
8. Теоретический анализ гравитационных и ротационных сил Земли 13
9. Обработка данных магнитотеллурических зондирований 15
10. Варианты заданий 17
11. Справочный отдел 21

МИНОБРНАУКИ РФ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

ОДОБРЕНО
методической комиссией
факультета геологии и геофизики
Председатель комиссии



_____ В. И. Бондарев
«20» марта 2020 г.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

ККОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

«ФИЗИКА ЗЕМЛИ»

Специальность:
21.05.03 Технология геологической разведки

форма обучения: очная, заочная

Екатеринбург

2020

СОДЕРЖАНИЕ

Введение
1. Задания контрольной работы
2. Методические рекомендации по выполнению контрольной работы
   2.1 Оформление контрольной работы
   2.2 Критерии оценки контрольной работы
3. Методические рекомендации по составлению глоссария
4. Рекомендуемая литературы для выполнения контрольной работы

Введение

Данные методические указания разработаны в помощь для выполнения контрольной работы по курсу «Физика Земли».

В методических рекомендациях содержится: перечень вопросов контрольной работы, методические рекомендации по выполнению контрольной работы, перечень рекомендуемых учебных изданий, интернет-ресурсов, дополнительной литературы.

Внимательно прочитайте задание контрольной работы, подготовьте рекомендуемую вам литературу (при необходимости), ознакомьтесь с рекомендациями по выполнению работы, с критериями оценивания работы.

Прежде чем сдать выполненную контрольную работу преподавателю на проверку, выполните самооценку по заданным критериям.

Контрольная работа является обязательной для каждого обучающегося и определяется учебным планом. Наличие положительной оценки по контрольной работе необходимо для получения промежуточной аттестации по дисциплине «Физика Земли».

1. Задания для контрольной работы

Вариант 1

Дайте определения следующим понятиям: сила тяжести, сила тяготения, ускорение силы тяжести, гравитационный потенциал. Укажите на отличительные особенности силы тяжести и силы тяготения.

Вариант 2

Для исследования внутреннего строения Земли используют различные методы. Перечислите эти методы и дайте им сравнительную характеристику.

Вариант 3

Опишите сущность радиоизотопного метода определения абсолютного возраста горных пород?

Вариант 4

Земной магнетизм обусловлен действием постоянных источников, расположенных внутри Земли и испытывающих лишь медленные вековые изменения (вариации) и

внешних (переменных) источников, расположенных в магнитосфере Земли и ионосфере. Что это за источники геомагнитного поля и почему различают основное (главное ~99%) и переменное (~1%) геомагнитные поля?

Вариант 5

Для исследования внутреннего строения Земли используют различные методы. Перечислите эти методы и дайте им сравнительную характеристику.

Вариант 6

Земля несет на себе отрицательный электрический заряд. Откуда и как берется этот на Земле этот заряд? Какие сопутствующие явления имеют место при образовании электрического заряда Земли?

Вариант 7

С какой линейной скоростью (в метрах в секунду) движется Екатеринбург, широта которого $56^0\ 51^/$.

Вариант 8

Если Землю представить глобусом с диаметром в 3 м, как выразится тогда сжатие Земли?

Вариант 9

О глубинном строении Земли судят по продольным и поперечным сейсмическим волнам, которые, распространяясь внутри Земли, испытывают преломление, отражение и затухание, что свидетельствует о расслоености Земли. Сформулируйте основные законы, описывающие указанные процессы.

Вариант 10

Тепловой поток в точке поверхности Земли составляет 0.071 Вт/м^2 . Какой тепловой поток поступает с поверхности мантии, если коэффициент теплопроводности пород земной коры здесь составляет в среднем 2.5 Вт/(мК), а её мощность -–40 км? Температурный градиент –2º /100 м.

Вариант 11

Для того чтобы стрелка компаса, устанавливаясь в плоскости магнитного меридиана, находилась в то же время в горизонтальном состоянии, на южную или северную часть стрелки прикрепляют уравновешивающий груз. С какой стороны необходимо прикрепить груз к стрелке компаса в двух исследуемых точках (долгота 0^0, широта 20 и широта -40)? В какую сторону (к центру или от центра стрелки) необходимо переместить груз для пользования в настоящем году, если последний раз компасом пользовались в 1975 году?

Вариант 12

Охарактеризуйте карты элементов геомагнитного поля (Z,H, T, dT, dH, dZ) эпохи 2015 года.

Вариант 13

Считая скорость изменения элементов геомагнитного поля постоянной с 1975 года, определите значения элементов магнитного поля для текущего года. Начертите в плоскости магнитного меридиана полный вектор геомагнитного поля T, его горизонтальную (H) и вертикальную (Z) составляющие. Покажите на построенной векторной диаграмме наклонение I. В чем принципиально отличаются векторные диаграммы геомагнитного поля в северных и южных широтах?

Вариант 14

Рассчитайте энергию, выделяющуюся в Земле за счёт радиоактивного распада в течение года. Русский учёный В.И. Вернадский считал радиогенную энергию основной для эволюции Земли. Прав ли он, если Земля ежегодно излучает в космическое пространство порядка 9,2·1020Дж, а потери её на тектоно-магматические процессы составляют около 1,26·1020 Дж/год?

Вариант 15

Определите энергию приливного торможения Земли, выделившуюся за период её жизни, если угловая скорость вращения Земли за это время уменьшилась в 2 раза. За счёт чего происходит замедление вращения Земли?

Вариант 16

Оцените среднюю плотность слоев Земли: земной коры, мантии и ядра. Сравните со средней плотностью вещества Земли. Плотности каких минералов они соответствуют? Предложите состав ядра.

2. Методические рекомендации по выполнению контрольной работы

Контрольная работа является индивидуальной самостоятельно выполненной работой студента.

Контрольная работа должна содержать следующие структурные элементы:

1. титульный лист;
2. содержание;
3. ответы на контрольные вопросы;
4. список использованных источников;
5. приложения (при необходимости).

Количество источников в списке определяется студентом самостоятельно, рекомендуемое количество от 5 до 10. При этом в списке обязательно должны присутствовать источники, изданные в последние 5 лет.

2.1 Оформление контрольной работы

При выполнении контрольной работы необходимо соблюдать следующие требования:

- текст располагается на одной стороне листа белой бумаги формата А-4;
- размер шрифта - 14 Times New Roman, цвет – черный;
- междустрочный интервал – полуторный;
- поля на странице – размер левого поля – 2 см, правого – 1 см, верхнего - 2 см, нижнего – 2 см;
- текст должен быть отформатирован по ширине листа;
- на первой странице необходимо изложить план (содержание) реферата;
- в конце работы необходимо указать источники использованной литературы.

Список использованных источников должен формироваться в алфавитном порядке по фамилии авторов.

Включенная в список литература нумеруется сплошным порядком от первого до последнего названия. По каждому литературному источнику указывается: автор (или группа авторов), полное название книги или статьи, место и наименование издательства (для книг и брошюр), год издания; для журнальных статей указывается наименование журнала, год выпуска и номер. По сборникам трудов (статей) указывается автор статьи, ее название и далее название книги (сборника) и ее выходные данные. На использованные источники в тексте работы должны быть ссылки

2.2 Критерии оценки контрольной работы

Срок сдачи готовой контрольной работы определяется утвержденным графиком. В случае отрицательного заключения преподавателя студент обязан доработать или переработать контрольную работу. Срок доработки контрольной работы устанавливается преподавателем с учетом сущности замечаний и объема необходимой доработки.

Контрольная работа оценивается по системе:

Оценка "отлично" выставляется за контрольную работу, которая носит исследовательский характер, содержит грамотно изложенный материал, с соответствующими обоснованными выводами.

Оценка "хорошо" выставляется за грамотно выполненную во всех отношениях контрольную работу при наличии небольших недочетов в его содержании или оформлении.

Оценка "удовлетворительно" выставляется за контрольную работу, которая удовлетворяет всем предъявляемым требованиям, но отличается поверхносностью, в ней просматривается непоследовательность изложения материала, представлены необоснованные выводы.

Оценка "неудовлетворительно" выставляется за контрольную работу, которая не носит исследовательского характера, не содержит анализа источников и подходов по выбранной теме, выводы носят декларативный характер.

Обучающийся, не представивший в установленный срок готовую контрольную работу, которая была оценена на «неудовлетворительно», считается имеющим академическую задолженность и не допускается к сдаче экзамена или зачета.

3. Составление глоссария

Выполнить подбор и систематизации терминов, непонятных слов и выражений, встречающихся при выполнении контрольной работы. Расположить после основной части контрольной работы название и значение терминов, слов и понятий в алфавитном порядке.

Роль студента: прочитать материал источника, выбрать главные термины, непонятные слова; подобрать к ним и записать основные определения или расшифровку понятий; критически осмыслить подобранные определения и попытаться их модифицировать (упростить в плане устранения избыточности и повторений.

4.Рекомендуемая литературы для выполнения контрольной работы

Основная литература

1. Магницкий В.А. Внутреннее строение и физика Земли / В.А.Магницкий. - М. : Недра, 2006 - 390 с Гаврилов В.П. Физика Земли: учебник для вузов.М.: Недра – Бизнесцентр, 2008. – 287 с.
2. Павлов А. Н. Геофизика. Общий курс о природе Земли: Учебник / Павлов А. Н. - Санкт-Петербург: Российский государственный гидро-метеорологический университет,2006, ISBN 5-86813-175-4.-454. http://www.iprbookshop.ru/12484
3. Алексеев А. С. Методы решения прямых и обратных задач сейсмологии, электромагнетизма и экспериментальные исследования в проблемах изучения геодинамических процессов в коре и верхней мантии Земли/ Алексеев А. С.- Новосибирск: Сибирское отделение РАН,2010, ISBN 978-5-7692-1135-5.-310 http://www.iprbookshop.ru/15806

Дополнительная литература

1. Орленок В. В. Глобальный вулканизм и океанизация Земли и планет: Монография / Орленок В. В.- Калининград:Российский государственный университет им. Иммануила Канта,2010, ISBN 978-5-9971- 0022-3.-196. http://www.iprbookshop.ru/7358
2. Павлов А. Н. Геофизика. Тема 3 Физические модели Земли. Тема 4 Геофизические поля: Конспект лекций / Павлов А. Н. - Санкт-Петербург: Российский государственный гидро- метеорологический университет, 2004.-69. http://www.iprbookshop.ru/17906
3. Авсюк Ю.Н. Приливные силы и природные процессы. М.: ОИФЗ РАН, 1996, 188 с.
4. Моги К. Предсказание землетрясений / Пер. с англ. М.: Мир, 1988, 382 с.
5. Моисеенко У.И., Смыслов А.А. Температура земных недр. Л.: Недра, 1986, 180 с.
6. Орленок В.В. Физика и динамика внешних геосфер. М.: Недра, 1985, 183 с.
7. Паркинсон У. Введение в геомагнетизм / Пер. с англ. М.: Мир, 1986, 528 с.

Единое окно доступа к образовательным ресурсам - Режим доступа: http://window.edu.ru

Составитель: _____ Л.А. Болотнова, доцент, к.г.-м.н.

подпись

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебно-методическому комплексу
_____ С.А. Упоров

МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

«ФИЗИКА ГОРНЫХ ПОРОД»

специальность

21.05.03 Технология геологической разведки

форма обучения: очная, заочная

год набора: 2021

Автор: Земцов Н.С. к.г.-м.н.

Одобрен на заседании кафедры	Рассмотрен методической комиссией факультета
Геофизики	
(название кафедры)	*(название факультета)*
Зав.кафедрой _____	Председатель _____
(подпись)	*(подпись)*
Талалай А. Г.	Бондарев В. И.
(Фамилия И.О.)	*(Фамилия И.О.)*
Протокол № 1 от 05.10. 2020	Протокол № 8 от 13.10. 2020
(Дата)	*(Дата)*

Екатеринбург
2020

Петрофизика-это одна из наук о Земле, изучающая физичекие свойства минералов, горных пород и руд. Целью изучения
петрофизических характеристик является установление состава,
структуры и состояния пород, особенностей дифференциации физических свойств горных пород, околорудных зон и полезных ископаемых
при решении задач поисков и разведки МШИ, геологического картирования, геотектоники, геодинамики, инженерной геологии геологии.

Петрофизические исследования позволяют обосновать возможность применения отдельных геофизических методов и комплекса геофизических исследований. Наряду с этим петрофизика позволяет решать широкий класс задач прикладного и теоретического характера,
от изучения состава и генезиса рудных и акцессорных минералов
(магнитная минералогия, петрофизика полупроводниковых минералов)
до опробования полезных ископаемых (скважинная и шахтная геофизика), от стратиграфии осадочных комплексов (палеомагнитология)
до прогнозирования состояния вещества в глубинных частях Земли
(экспериментальная и теоретическая петрофизика).

Современная петрофизика изучает широкий спектр Физических
свойств минералов, горных пород и полезных ископаемых:
коллекторские (пористость, проницаемость, влажность, влагоемкость, нефте - и газонасыщенность), плотностные, магнитные (магнитная восприимчивость, остаточная намагниченность, температура
Кюри), электрические (Удельное сопротивление, диэлектрическая
проницаемость, вызванная поляризация, диффузионно-адсорбционная
активность, терма—ЭДС), тепловые (теплоемкость, теплопровод—
ность), ядернофизические (естественная радиоактивность, сечения
взаимодействия и параметры переноса излучений), упругие (упругие
модули, скорости распространения упругих волн).

Курс петрофизики в УГГГА читается на 5 семестре, опережая или
параллельно с основными методами разведочной геофизики. Малый
объем часов (около 40 лекционных) не позволяет подробно изложить
все традиционные разделы петрофизики, обычно рассматриваемые в
учебниках. Поэтому автор рассматривает физические свойства, лежащие в основе гравиразведки, магниторазведки, электроразведки,

сейсморазведки. Главное внимание уделяется факторам, определяющим петрофизические характеристики горных пород, связям физических свойств с петрографическими характеристиками. Петрофизические модели месторождений полезных ископаемых рассмотрены на отдельных примерах, методики и аппаратура петрофизических исследований вынесены на лабораторный практикум и учебно-методическую практику,

1. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Когда ставится задача изучения каких—либо физических свойств

(например, плотности или магнитной восприимчивости) массива магматических или определенного горизонта осадочных горных пород, то из этих объектов (обнажении, горных выработок, керна буровых скважин) отбирается некоторое количество образцов, у которых измеряются соответствующие Физические характеристики. При этом оказывается, что измеренные значения у разных образцов различны.

Эти различия не связаны с погрешностями измерений, а есть результат вариаций физических свойств изученных образцов, т.е. следствие неоднородности объекта исследования. Дело в том, что формирование горных пород (и соответственно их физических свойств) происходит под воздействием большого числа факторов внутренних и внешних. Например, при образовании массивов магматических пород состав и структура будет определятся такими главными факторами:

1.Изменением глубины кристаллизации расплава.
2.Неоднородностью распределения давления и температуры в пределах магматического тела.
3.Фракционной и гравитационной дифференциацией.
4.Перемешиванием расплава.
5.Вааимодействием магмы с вмещающими породами различного состава.

Каждый из перечисленных факторов в свою очередь является сложной функцией от координат и времени. Результатом будет неоднородность состава, размера зерен, структуры и текстуры в пределах массива и как следствие, неоднородность физических свойств. Многообразие действующих факторов, их неопределенность во времени и пространстве позволяют рассматривать их как случайные события, а физические свойства — как случайные величины, к которым может быть применен аппарат математической статистики.

При образовании осадочных (например, обломочных) пород главными факторами являются:

1. Вещественный состав пород источника сноса, характер и степень их выветривания

2.Удаленность бассейна осадконакопления, глубина его, гидродинамические характеристики.

3.Химический состав и степень минерализации вод, окислительно-восстановительный потенциал, РН и т.д.

В процессе Формирования породы эти факторы изменяются в связи с изменениями источников сноса, глубин, гидродинамических и гидрохимических условий, что приводит к изменениям состава обломков, размеров и степени отсортированности зерен, количества и типа цемента и т.д. Возникает первичная неоднородность физических свойств.

На первичную неоднородность может накладываться вторичная, связанная с процессами преобразования: выветриванием, трещиноватостью, метаморфизмом, привносом и выносом вещества и т.д.

Учитывая, что студентам будет читаться специальный курс "Теоретические основы обработки результатов геофизических измерений", ниже приводятся только самые элементарные сведения по статистической обработке результатов изучения физических свойств горных пород, необходимые для понимания последующих разделов.

Предположим, что мы имеем М измерений некоторого физического параметра X, среди которых присутствуют максимальное X_{max} и минимальное X_{min} значения. Разобьем весь диапазон измеренных значений на п интервалов с шириной каждого АХ:

$$\Delta X = (X_{max} - X_{min})/n \text{ , (1.1)}$$

Количество интервалов т связано с объемом выборки N и обычно определяется формулой Старджеса:

$$n = 3.3 * lgN + 1$$

где n округляется до целого числа.

Подсчитаем N_i -число измерений, параметр X которых попадает в 1-й интервал (1=1,2...n). Строится график зависимости N_i или $(N_i/N)*100^2$ от X. В каждом интервале рассчитанное значение изображается в виде отрезка горизонтальной линии (гистограмма). На рисунке 1.1 приведен пример гистограммы для N=40, n=5.

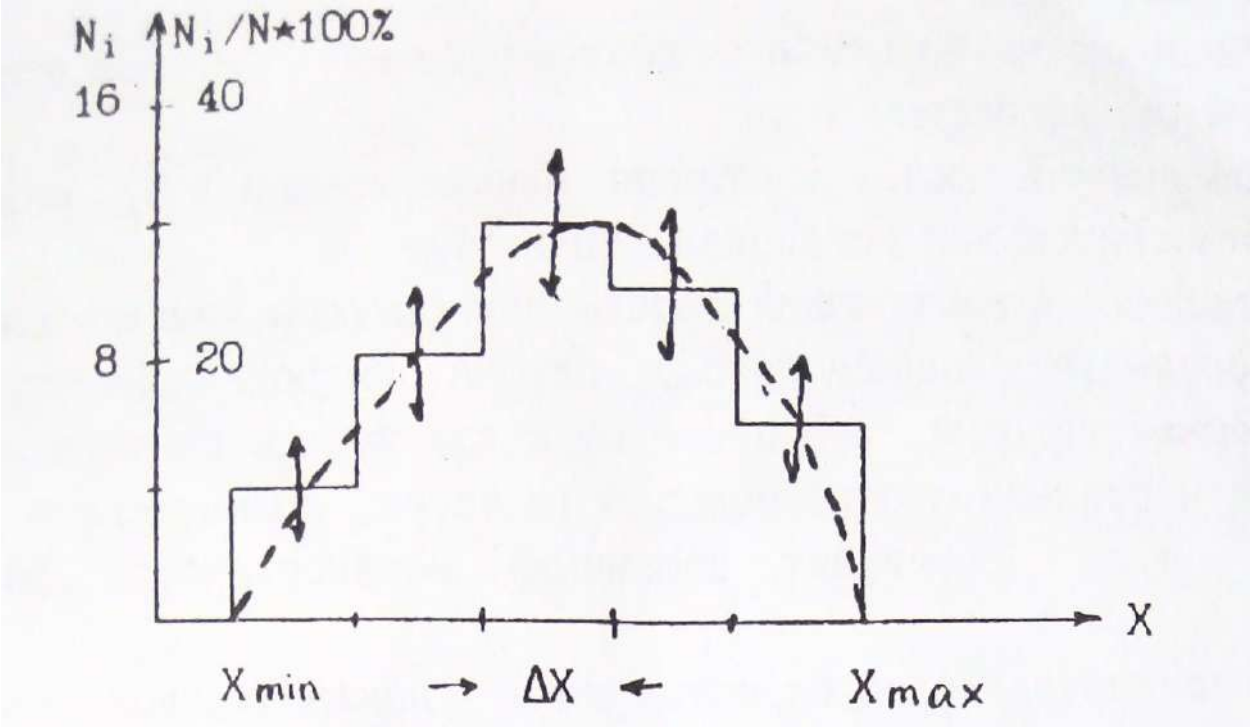


Рис.1.1. Гистограмма распределения параметра X

Гистограмма содержит в себе все статистические характеристики объекта исследования. В частности, величина $(N_i/N)*100\%$
представляет вероятность (в %) для данного объекта существования значении параметра X в пределах 1-го интервала. При построении реальных гистограмм не следует абсолютизировать полученный результат. Дело в том, что мы всегда имеем дело с ограниченными выборками и каждое значение N_i получено с погрешностью, вероятное
значение которой приближенно оценивается как $\pm\sqrt{N_i}$ (на рис. показано стрелками).

При неограниченном возрастании объема выборки ($N \to \sim$), число интервалов (n) также стремится к бесконечности, а ширина интервала (ΔX) к нулю и мы получаем непрерывную кривую распределения, КОТОРУЮ часто называют вариационной кривой. Приближенно вариационную кривую можно получить путем визуального сглаживания гистограммы таким образом, чтобы площади между осью абсцисс и гистограммой и осью абсцисс и вариационной кривой были равны (изображено пунктирной линией).

Опыт Изучения физических свойств показывает, что часто распределения их подчиняется двум законам: нормальному и логнормальному — ПРИ нормальном законе кривая распределения P(X) описывается выражением:

$$F(X) = \frac{\exp[-\frac{(X_K - MX)^2}{2\sigma^2}]}{\sigma\sqrt{2\pi}}, \quad (1.2)$$

где MX—мода параметра или значение его в максимуме распределения (для нормального закона совпадает со средним значением параметра: $MX = \bar{X} = \frac{\sum X_k}{N}$ k=(1,2...N).

σ-среднеквадратичное отклонение (σ^2—называют стандартом).
Нормальному закону подчиняется обычно распределение плотности, пористости, скорости продольных волн. На рис.1.2 приведен пример нормального распределения с двумя различными значениями стандарта.

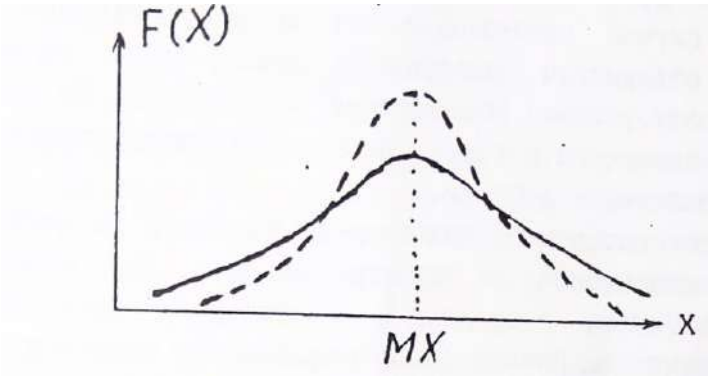


Рис.1.2. Нормальное распределение параметра X

Кривая характеризуется симметрией относительно моды и полностью определяется двумя величинами MX и σ. Логнормальныи закон соответствует случаю, когда нормальному закону подчиняется логарифм параметра (logX). Этому закону обычно подчиняется распределение магнитной восприимчивости, удельного электрического сопротивления, нефтенасыщенности. Для практического построения гистограмм или вариационных кривых в предположении существования лог-нормального закона измеренным значениям $X_к$ вычисляются значения $\log X_к$, которые обрабатываются способом, описанным выше.

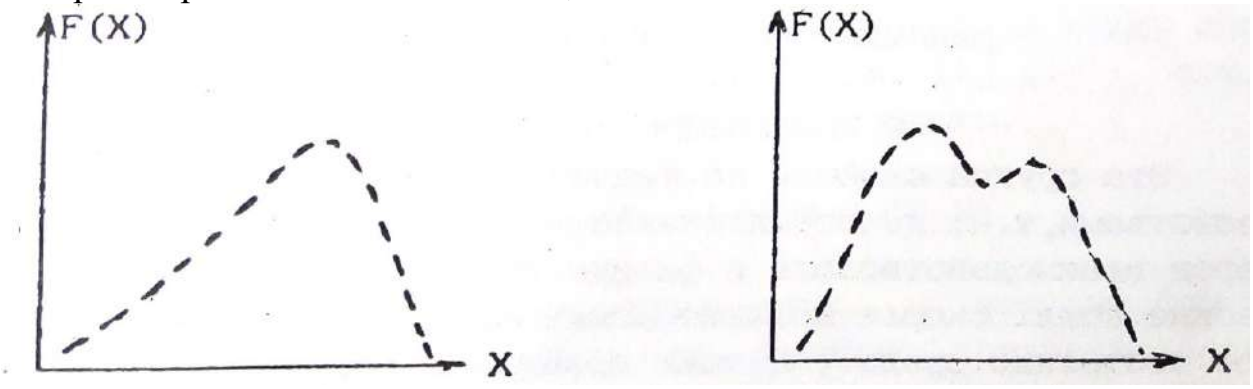


Рис.1.3.Примеры реальных кривых распределения

Реальные кривые распределения часто отличаются от теоретических
Они могут быть асимметричными и даже иметь два и более максимумов (рис. 1.3).

В первому случае появляются новые характеристики распределения (одна или более), например параметр асимметрии. В любом случае выборки считаются статистически одинаковыми если все (!) статистические параметры их одинаковы. Асимметрия обычно связана со
вторичными процессами изменения физических свойств в результате выветривания, регионального или локального метаморфизма и т.д.

Второй случай свидетельствует о неоднородности выборки; в
одну группу объединены различные по каким—либо характеристикам
породы (возраст, условия образования, минеральный состав, структура, степень изменения и т.д.). Необходимы дополнительные исследования для разделения выборки.

Важным следствием из изложенного является то, что все петрофизические зависимости не функциональные, а статистические,
то есть выполняются в среднем с определенной вероятностью отклонения от среднего. Пример такой зависимости приведен на рис.1.4.

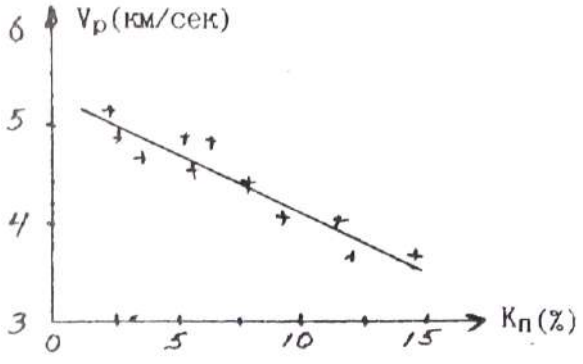


Рис.1.4. Зависимость скорости продольных волн (Vp)
от коэффициента пористости ($К_п$)(+ - экспериментальные значения)
2.КОЛЛЕКТОРСКИЕ СВОЙСТВА
Эта группа свойств не является в строгом смысле физическими
свойствами, т.к. непосредственно не определяет способности горных

пород взаимодействовать с физическими полями или создавать физические поля. Скорее коллекторские свойства характеризуют физическое состояние среды. В тоже время коллекторские свойства влияют
на другие Физические свойства (плотностные, электрические. Упругие) и определяют корреляционные связи между ними. С другой стороны,

коллекторские свойства, такие как пористость, проницаемость.
водо-, нефте- и газонасщенность. это важнейшие характеристики решенных месторождений углеводородов и подземных вод, определяющие запасы и условия эксплуатации этих месторождений сведения 0 коллекторских свойствах могут быть получены через плотностные, электрические и упругие свойства. Поэтому коллекторские
свойства рассматриваются во всех учебниках и курсах петрофизики.

2. 1. ПОРИСТОСТЬ

Пористостью называется совокупность пространства в горной
породе, не занятого твердой фазой. Оно заполнено газами, жидкостями (вода, нефть) или их смесями. Количественно пористость выражают через коэффициенты пористости К: отношение объема пор (Vпор) к
объему горной породы (Vг.п.) в процентах. Общий объем горной породы равен сумме объемов пор и твердой фазы ($V_{\text{г.п.}} = V_{\text{пор}} + V_{\text{т.ф}}$). При всем этом выделяют:

а) Коэффициент общей пористости ($К_{п}$) — отношение объема всех
пор (Vпор) к объему породы:

$$К_{п} = (V_{\text{пор}}/V_{\text{г.п.}}) * 100\%, \quad (2.1)$$

6) Коэффициент открытой пористости ($К_{п.о}$) .- отношение объема
открытых пор (Vo.пор) к объему породы:

$$К_{п.о.} = (V_{\text{о.пор}}/V_{\text{г.п.}}) * 100\%. \quad (2.2)$$

Открытыми порами называются поры, сообщающиеся между собой.
в) Коэффициент динамической пористости ($К_{п.д}$) - отношение

объема динамических пор ($V_{д,пор}$) к объему породы.

$$К_{п.д} = (V_{\text{д.пор}}/V_{\text{г.п.}}) * 100\%. \quad (2. 3)$$

динамическими порами называются поры, по которым происходит движение жидкостей или газов при наличии градиента-давления. Часть открытых пор может быть представлена тупиковыми порами или водой, прочно связанной с поверхностью твердой фазы, и не участвует в переносе жидкостей или газов. Очевидно, что Кп > Кп.о) Кп.д.

2.1.1. Классификация пор.

1) По происхождению поры подразделяются на первичные и вторичные. Первичные возникают при образовании породы и представлены структурными порами — промежутками между частицами обломочных „о-род (грубообломочных, песчанистых, алевритовых, глинистых), межкристаллическими промежутками магматических и метаморфических пород и т. д. При уплотнении цементации, перекристаллизации, мета-морфизме форма и размеры первичных пор могут меняться. Вторичные поры образуются при последующих воздействиях на породы процессов выветривания, выщелачивания, кристаллизации, тектонических нагрузок и т.д.

2) По форме поры могут быть близкими к **ромбоздальным** (рыхлые отсортированные обломочные осадочные породы), близкими к **тетраэдрическим** (те же, но уплотненные породы), **щелевидным** (порода состоит из пластинчатых минералов: слюды, глины), в виде **канальцев** переменного сечения (плохо отсортированные обломочные породы), **трещеновидные** (магматические, метаморфические, плотные оса-дочные породы, испытавшие воздействие сильных тектонических нагрузок), **каверновидные** (карбонатные породы, подвергшиеся процессам растворения и выщелачивания), **пузырчатые** (магматические породы), **ячеистые** (известковые и кремнистые туфы), **каналовидные** (лёссы).

3) По размерам выделяют а) **сверхкапиллярные** - эффективный (средний) диаметр сечения пор $d_{э.ф.}$ более 0,1 мм. (грубообломочные породы типа галечников и гравия, крупно— и среднезернистые пески, оолитовые известняки, выщелоченные карбонаты). В сверхкапиллярных порах доля воды, связанной с поверхностью твердой фазы, не велика, вода в основном свободная и перемещается по законам гидродинамики. б) Капиллярные - эффективный диаметр пор $d_{э.ф.}$ $1*10^{-4}$-$1*10^{-1}$ мм. (мелкозернистые, менее отсортированные, сцементированные пороли: мелкозернистые пески и песчаники, некоторые карбонатные породы)-

В **Капиллярных** порах более высокое содержание связанной воды И возможен ее подъем в силу поверхностного натяжения. в) **Субкапиллярные** - $d_{э.ф.}$<1*10^{-4} мм. (глины, микрокристаллические известняки, туфы). Практически вся вода перового пространства связана на поверхности твердой фазы, перемещения воды почти нет.

2.1.2. ПОРИСТОСТЬ ОБЛОМОЧНЫХ ОСАДОЧНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

Основными факторами определяющими пористость обломочных пород являются: 1) форма и размер обломков, 2) степень отсортированности 3) степень уплотнения и цементации.

1) Влияние Формы и размера частиц иллюстрируется таблицей, в которой приведены значения Кп (%) для искусственных пород:

Таблица 1

Размер частиц (мм.)	Кварц окатанный	Кварц остроуг.	Ортоклаз остроуг.	Слюда
2-1	33	38	45	80
0.5-0.25	33	41	49	72
0.1-0.06	39	45	52	68

Отмечается малое влияние размера частиц и существенно большее формы (пористость возрастает в 2-2.5 раза при переходе от изометричных зерен к пластинчатым).

2) Степень отсортированности характеризует распределение обломков по размерам и количественно выражается через коэффициент отсортированности G_f:

$$G_f = \frac{d_{\text{ср}} - \sum V_i \delta d_i}{d_{\text{ср}}}, \quad (2.4)$$

где $V_i -$ объемное содержание частиц диаметра d_i в породе,

δd_i—отклонение от среднего диаметра 1-й группы, '

$d_{\text{ср}}$- средний диаметр частиц.

Коэффициент отсортированности меняется от 1 (хорошо отсортированная порода, все частицы одного размере) до 0 (плохо отсортированная порода. размеры частиц равномерно распределен от о до d_{max}).
присутствие в породе частиц разного размера приводит к тому, что
мелкие частицы заполняют промежутки между крупными и уменьшение коэффициента G_f (ухудшение отсортированности) ведет к уменьшению коэффициента пористости.

На рис.2.1 приведен пример такой зависимости.

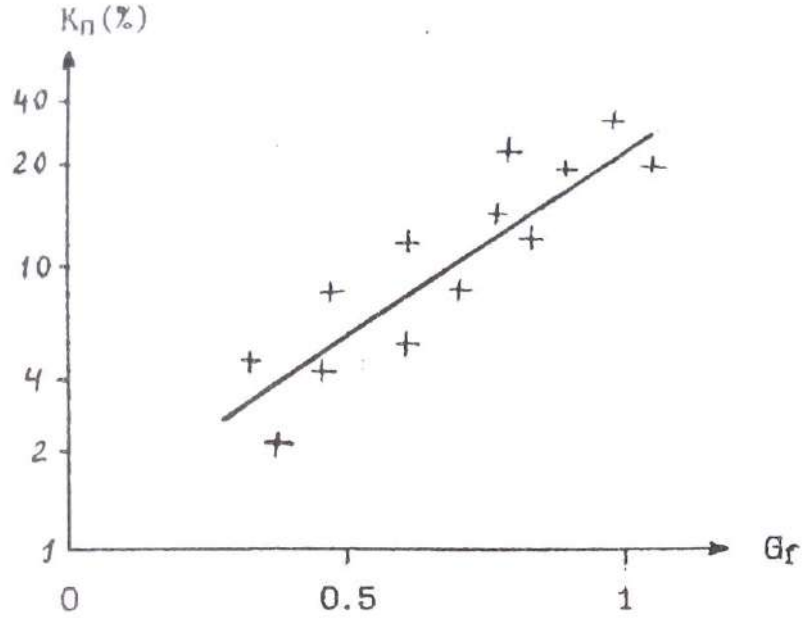


Рис.2.1. Зависимость коэффициента пористости от
коэффициента отсортированности песчаников
и алевролитов Туймазинской площади

Изменение отсортированности может приводить к изменение пористости на порядок. В связи с этим интересно рассмотреть изменение пористости песчано—глинистых образований в зависимости от
состава (рис.2,2). . '

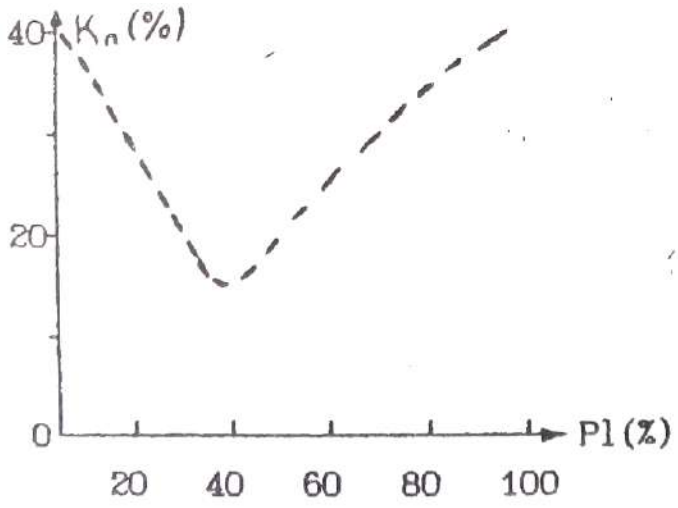


Рис.2.2. Зависимость коэффициента пористости от глинистости (Р1) песчано—глинистых отложении (теоретическая зависимость)

Положим, что песчаная и глинистая фракции представлены однородными по размерам частицами каждая (песчаная крупными, глинистая мелкими). Коэффициенты пористости каждой фракции около
40%. При увеличении глинистости (Р1) в породе будет происходить уменьшение пористости в результате частичного заполнения глинистыми частицами промежутков между крупным песчинками. При достижении 40% глинистости все эти промежутки (поры) будут заполнены
глинистым материалом (минимальная отсортированность), а Кп равен
0.4*0.4=0.16 (16%). При дальнейшем увеличении глинистости отсортированность и коэффициент пористости будут возрастать.

3) Под действием нагрузки вышележащих пород первичные рыхлые осадки уплотняются, что приводит к уменьшению их пористости. В начале уплотнение связано с перемещением отдельных частиц и более компактным их взаимным расположением. Затем происходит частичное разрушение и сшивание обломков (ухудшение отсортированности).
Этот процесс идет при нагрузках, превышающих несколько тысяч кг/см2. Наиболее сильно уплотняются глины, коэффициент пористости которых под нагрузкой может меняться от 50%. до 5%. В результате для многих районов, сложенных обломочными породами, наблюдается корреляционная связь Кп и глубины залегания породы:

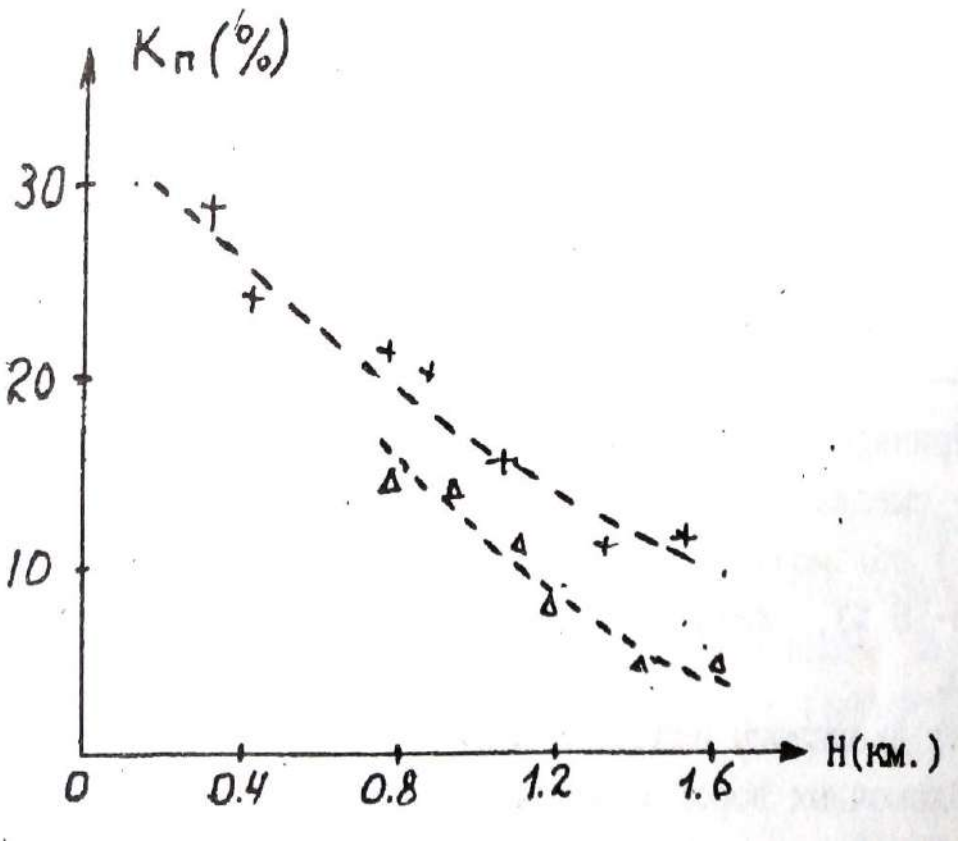


Рис.2,3. Зависимость Кп от глубины залегания Н;
+-глины, Δ- алевролиты

$$К_п(H) = К_п(0) * \exp(-\beta H), \quad (2.5)$$

где $К_п$ (0) — коэффициент пористости вблизи поверхности,
β - константа, зависящая от типа отложений (β=0.05).
Уравнения типа (2.5) позволяют прогнозировать изменения пористости с глубиной, что очень важно при интерпретации результатов геофизических съемок, т.к. величина пористости определяет ряд других
физических свойств: плотность, удельное электрическое сопротивление, скорость упругих волн.

Процесс цементации заключается в выпадении вторичных минералов (карбонаты, опал, глинистые минералы и т.д.) в поровом пространстве из поровых вод. В результате пористость уменьшается
вплоть до нескольких процентов.

В заключение приведем данные по пористости некоторых типов
обломочных пород.

Таблица 2

Порода	Кп(%)	
	Пределы	Наиболее вероятные

Пески	5-55	20-35
Песчаники	0.5-40	5-30
Лессы	40-55	40-55
Алевролиты	1-40	3-25
Глины	1-75	20-50
Аргиллиты	1-30	1.5-15

Приведенные в таблице данные позволяют сделать следующие основные выводы:

1) обломочные породы обычно характеризуются средней (Кп=10-15 %), повышенной (Кп=15-20 %) и высокой (Кп>20 %) пористостью.

2) диапазоны значений коэффициентов пористости различных типов обломочных пород в значительной степени перекрываются. Следует подчеркнуть, что данные таб.2 обобщают сведения о пористости пород всей страны в целом. В конкретных районах, у конкретных пластов диапазон колебания Кп может быть существенно уже. Например,

пласты – коллекторы AB_{2-5} одного из нефтяных районов Тюменской области имеют Кп=20-30 %

2.1.3. ПОРИСТОСТЬ КАРБОНАТНЫХ ОСАДОЧНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

первичные карбонатные осадки (известковые и доломитовые илы) имеют высокую пористость (Кп=60-80 %). По мере их уплотнения пористость резко уменьшается (Кп=0.5—15 %). В дальнейшем появляется вторичная пористость, обусловленная перекристаллизацией, трещиноватостью и выщелачиванием карбонатных пород. Характерная особенность карбонатных пород - неравномерность распределения пористости в пространстве. Поэтому. при изучение карбонатных коллекторов необходимо отбирать - большое количество образцов с различных интервалов по глубине и площади. Значения пористости основных типов карбонатных пород приведены в таблице 3.

Таблица 3

Порода	Кп(%)	
	пределы	Наиболее вероятные
Известковый ил	65-85	-

Известняки	0.5-48	1.5-15
Известковый туф	20-30	-
Мел	10-55	40-50
Доломиты	0.1-37	3-20

2. 1.4 ПОРИСТОСТЬ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ОСАДОЧННХ ГОРНЫХ ПОРОД.

В отличие от двух предыдущих групп пород, гидрохимические

осадки характеризуются пониженными и низкими значениями коэффициентов пористости. Так у ангидритов Кп=0.2—15 % у гипсов 1-25 %,

У каменной соли 0-5 %.

2.1.5 ПОРИТОСТЬ МАГМАТИЧЕСКИХ И МЕТАМОРФИЧЕСКИХ ГОРНЫХ ПОРОД

Для этой категории пород характерна низкая пористость. Исключение составляют кайнотипные эффузивы, которые в силу особенности образования (быстрое остывание, не полный отход летучих
компонент), могут иметь повышенную и высокую пористость. Таблица 4 иллюстрирует значения коэффициента общей пористости магматических и метаморфических пород.

Таблица 4

Порода	Кп(%)
	Пределы
Граниты	0.3-4
Габбро	0.3-3
Пироксенит	0.2-2
Базальт	0.5-40
Диабаз	0.2-3
Порфирит	0.4-6
Гнейс	0.2-6

Сланец хлорит.	0.2-1
Амфиболит	0.1-6

данные относятся к невыветрелым породам. В процессе выветривания пористость возрастает (образование вторичной пористости)
и может достигать 20 - 40 %.

Другая особенность данной группы пород состоит в существенном преобладании закрытой пористости над открытой.

2.1.6 ПОРИСТОСТЬ ГИДРОТЕРМАЛЬНО ИЗМЕНЕННЫХ ПОРОД

К гидротермально измененным породам приурочены месторождения
рудных полезных ископаемых. Многочисленные исследования показали.
что зоны развития этих пород характеризуются повышенными значениями пористости по сравнению с неизмененными ,породами. Вероятно
это связано с тем, что гидротермальные растворы могут перемешаться в средах с повышенной пористостью и проницаемостью. Таким образом, зоны повышенной пористости являются своеобразным индикатором

гидротермальных процессов и, косвенно, признаком оруденения.
На рисунке 2.4 приведен пример распределения пористости в районе медноколчеданного оруденения.

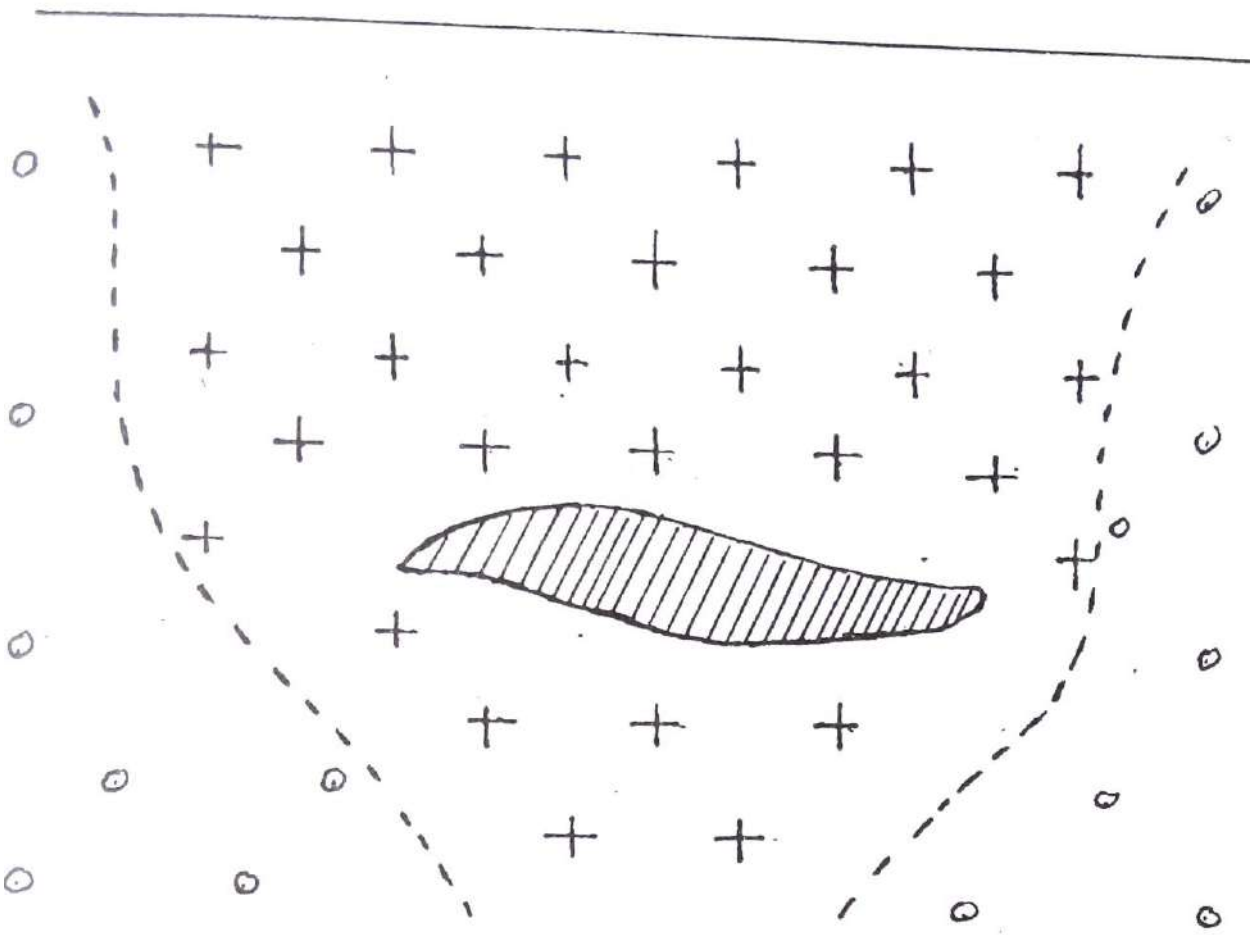


Рис.2.4. Распределение коэффициента открытой пористости
на месторождении Абеи-Саз (Башкирия)
-рудное тело
-Кп.о=0.5-3 %
-Кп.о<0.2%

2.2. ВЛАЖНОСТЬ. ВЛАГОЕМКОСТЬ

Влажность определяется, как количество воды в горной породе,
а **влагоемкость**, как способность горной породы удерживать воду. Вода в горных породах может присутствовать в различных видах:

а) **Прочно связанная вода** - слои воды толщиной в несколько молекул. непосредственно примыкающий к стенке перового канала. Эта
вода силами Ван-дер—Ваальса прочно связана с твердой фазой породы,
Не может перемешаться, обладает аномальными физическими свойствами

(плотность до 2 г/см3, температура замерзания до -78 C^o, повышенная вязкость, плохая растворимость солей).

б) **Рыхло связанная вода** - непосредственно примыкает к слою прочно связанной воды, менее прочно связана с твердой фазой. В частности, образуется в углах пор в силу поверхностного натяжения (стыковая вода). Толщина слоя рыхло связанной воды составляет десятки и более молекул, она имеет повышенную плотность и пониженную температуру замерзания.

в) **Свободная вода** - обычная вода, которая свободно перемещается в поровом пространстве по законам гидродинамики.

Выделяют несколько типов влагоемкости:

а) **Машинальная гигроскопическая влагоемкость** ($W_{мг}$) - максимальное количество парообразной влаги (в процентах к весу абсолютно сухой породы), которое способна поглотить порода из воздуха влажностью 94%. Эта влагоемкость включает в себя прочно связанную и часть рыхло связанной воды.

б) **Капиллярная влагоемкость** — полное количество воды, которое присутствует в породе в силу явления капиллярного подъема.

в) **Полная влагоемкость** - максимальное количество связанной и свободной воды, которое может присутствовать в горной породе.

Соотношение между связанной и свободной водой при полном заполнении перового пространства определяется сечением поровых каналов и составом твердой фазы породы. Относительное количество свободной воды уменьшается с уменьшением сечения пор и увеличением содержания глинистых минералов. В случае чистых глин в норах присутствует только связанная вода, а в грубообломочных породы (галечники, крупнозернистые пески) почти вся вода представлена свободной.
Двойной электрический слой.
Поверхность твердой фазы перового пространства адсорбирует ионы одного знака из поровых растворов. Эти ионы удерживаются на ней силами Ван—дер—Ваальса, создавая слой не компенсированных зарядов (слой потенциал-определяющих ионов). В результате электростатического взаимодействия из перового раствора к нему будут притягиваться ионы противоположного знака (слой противоинов).
что в совокупности создает двойной электрический слой. Противоионы образуют сложную пространственную структуру. На расстоянии порядка размера молекулы противоионы прочно удерживается силами электростатического взаимодействия и не могут перемещаться, образуя плотную часть двойного слоя. Дальше от поверхности твердой

фазы их концентрация убывает и они не столь сильно связаны с потенциал-определяющим слоем. Эта область называется диффузионной частью двойного слоя и может перемещаться при движении жидкости в поровом пространстве примерная структура двойного слоя приведена на рис. 2.5.

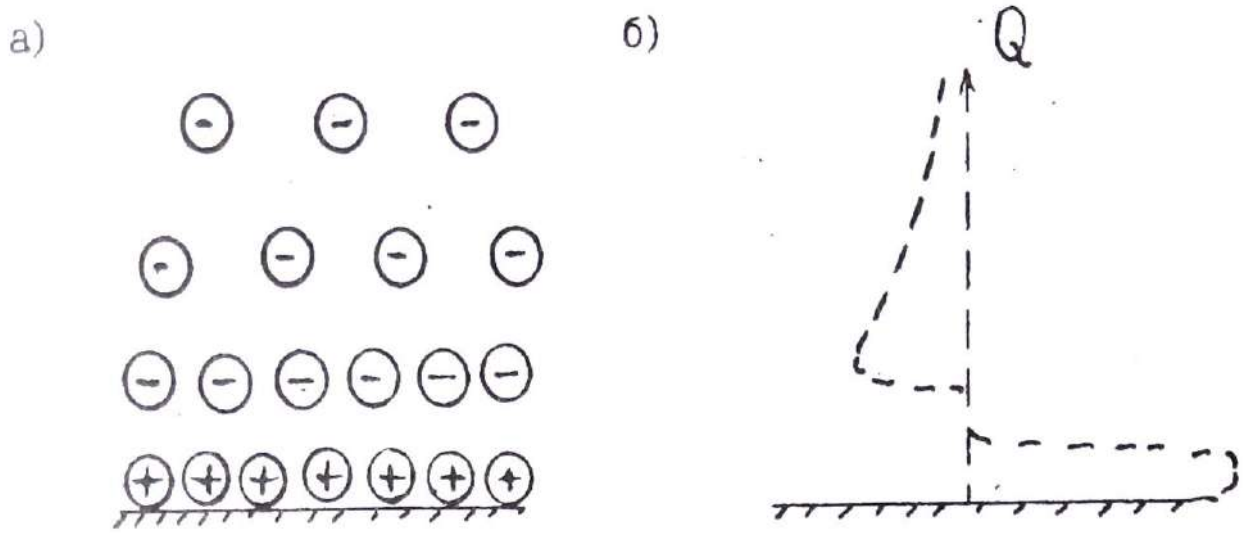


Рис.2.5. Строение двойного электрического слоя (а) и распределение заряда Q в пределах двойного слоя (б)

Область, занятая двойным слоем, примерно соответствует или несколько больше слоя прочно и рыхло связанной воды.

2. 3. ПРОНИЦАЕМОСТЬ

Проницаемостью называется способность горной породы пропускать жидкости, газы или их смеси при наличии градиента давления. Выделяют физическую или абсолютную и фазовую проницаемости.

2.3. 1. ФИЗИЧЕСКАЯ ПРОНИПАШОСТЬ

Это способность горных пород пропускать **однородные** жидкости или газы. Представим себе трубку, в которую помещен образец цилиндрической формы (Рис.2.б). На верхней грани образца давление P_1 на нижней P_2. Градиент давления равен $\frac{\Delta P}{L}$, где $\Delta = P_1 - P_2$, L-длина образца. Через нижнюю границу будет вытекать жидкость. раскол которой

равен Q ($см^3$/сек). Обозначим площадь поперечного сечения образца через S и введем удельный расход V=Q/S (расход через единицу площади поперечного сечения). Соотношение между этими величинами описываются законом Дарси: V прямо пропорционален градиенту давления и обратно пропорционален вязкости (μ).

$$V = К_{пр} \frac{\frac{P_1 - P_2}{L}}{\mu} (2,6)$$

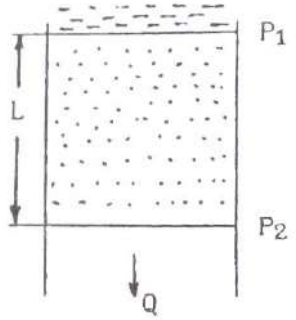


Рис.2.6. К определению коэффициента проницаемости

Коэффициент пропорциональности в этом уравнении (кпд) называется коэффициентом проницаемости, он является количественно характеристикой физической проницаемости. Единицей Кпр в системе СИ служит мг. Существует вне системная единица - Дарси, которая соответствет проницаемости породы, у которой удельный расход води равен 1 смз/сек при градиенте давления 1 атм/см. $1м^2 \approx 1 * 10^{12}$ Д или $1Д \approx 1 * 10^{-12}$ $м^2 = 1$ $мкм^2$.

Дарси крупная единица, обычно для характеристики проницаемости горных пород используют тысячную долю Дарси – 1мД, 1 мД=1 $фм^2$

2.3.2. СВЯЗЬ КОЭФФИЦИЕНТА ФИЗИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ С КОЭФФИЦИЕНТОМ ПОРИСТОСТИ И СТРУКТУРОЙ ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА

Для простейшей модели строения перового пространства в виде трубчатых капилляров (рис.2.7) выведено простое соотношение -

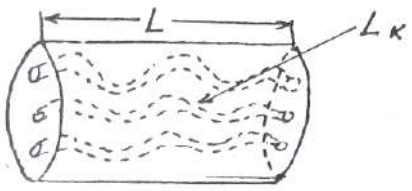


Рис.2.7. К пояснению формулы Козени—Кармана

формула Козени-Кармана

$$К_{пр} = \frac{К_{пд}^3}{S_ф^2 * T^2 * f}, (2.7)$$

Где $К_{пд}$ – коэффициент динамической пористости.
$S_ф$ – удельная поверхность порового пространства (площадь поверхности пор в единице объема горной породы.
$T=L_к/L$ -удельная извилистость поровых каналов (отношение средней длины перового канала Lк в пределах образца, к длине образца L. .
f - некоторый параметр, зависящий от формы сечения порового канала (лежит в пределах от 2 до 3).
(**Предупреждение**. В литературе в формулах типа 2.7 часто используют обозначение Кп или термин пористость вместо динамической пористости необходимо представлять, что движение флюидов возможно только по динамическим порам.)

Из формулы 2.7 следует сильная зависимость коэффициента проницаемости от коэффициента пористости (третья степень) и структуры перового пространства, которая для данной модели определяется величинами Т и $S_ф$.
На рис. 2.8 приведены примеры зависимости $К_{пр}$ от $К_{пд}$ (экспериментальные данные)

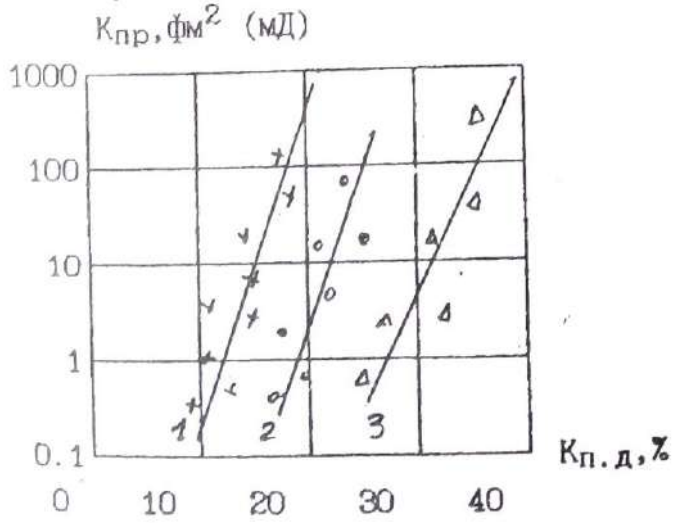


Рис.2.8. Зависимость коэффициента проницаемости от коэффициента динамической пористости 1 - песчаник, нижний вилькокс, 2 – песчаник слабо сцементированный, 3 - песчаник тонкозернистый

Линейный вид зависимостей в полулогарифмическом масштабе и угол наклона подтверждают зависимость $К_{пр}$ от третьей степени $К_{пд}$- Смещение линий в горизонтальном направлении обусловлено влиянием структуры порового пространства. Величина удельной по-

нием поровых каналов, и возрастает с уменьшением сечения. У обломочных пород сечение каналов связано с размером зерен. Например в случае отсортированной породы с изометричными обломками со средним диаметром d:

$$S_{\text{ф}} \approx 3.6/d \quad (2.8)$$

Таким образом, уменьшение размера верен приводит к уменьшению проницаемости. Это объясняет непроницаемость глин (тонкодисперсные породы), хотя коэффициент пористости у них составляет десятки процентов. Рис. 2.9 иллюстрирует подобную зависимость.

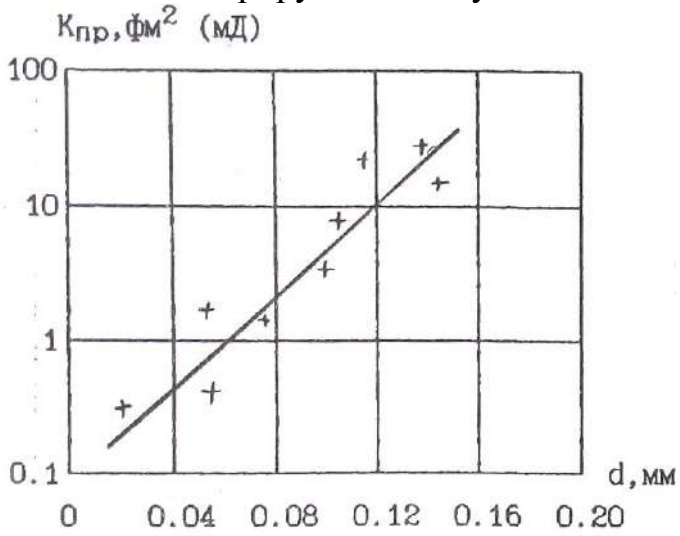


Рис. 2.9, Зависимость коэффициента проницаемости от среднего диаметра и зерен песчано—алевритово—глинистых пород

В случае трещинной пористости проницаемость определяется приближенным выражением:

$$\text{К}_{\text{пр}} \approx 8.45\ b^2 \quad (2.9)$$

где b — средний размер поперечного сечения трещин (раскрытость трещин) в мкм,
Кпт - коэффициент трещиной пористости в %.
По величине коэффициента проницаемости все породы подразделяются на три группы:

1. **Проницаемые** — грубообломочные породы (галечники, гравии), хорошо отсортированные, слабо сцементированные песчано—алевритовые породы, кавернозные и трещиноватые карбонатные породы, трещиноватые магматические породы, Это породы с высоким коэффициентом пористости (20-40%). сверхкапиллярными и капиллярными порами, существенным преобладанием свободной воды в поровом пространстве, Коэффициент проницаемости их лежит в пределах 10 - 10^6 фм^2 (мД).

2.**Полупроницаемые** — менее отсортированные песчано-алевритово-глинистые породы, мелкотрещинные меловидные карбонатные породы. поровое пространство представлено субкапиллярными порами, преобладает связанная вода. Кпр в пределах 0,1-10 фм^2 (мД).

3. **Практически непроницаемые** - глины, аргиллиты, сильно сцементированные песчаники и алевролиты, невыветрелые кристаллические карбонатные и магматические породы. Кпр < 0_1 фм^2 (мД).

2. 3. 3. ФАЗОВАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ

Это способность горной породы, насыщенной неоднородной жидкостью или смесью жидкостей и газов, пропускать ту или иную фазу при наличии градиента давления. Для обычных в горных породах фаз (вода, нефть, газ) количественно фазовая проницаемость характеризуется коэффициентами Фазовой проницаемости для воды (Кпр.в), нефти (Кпр.н) и газа (Кпр.г), которые являются коэффициентами пропорциональности в аналогах уравнения Дарси:

$$V_B = \text{К}_{\text{пр.в}} \frac{\frac{\Delta P}{L}}{\mu_{\text{н}}} \qquad V_{\text{Н}} = \text{К}_{\text{пр.н}} \frac{\frac{\Delta P}{L}}{\mu_{\text{н}}} \qquad V_{\Г} = \text{К}_{\text{пр.г}} \frac{\frac{\Delta P}{L}}{\mu_{\text{н}}}, (2.10)$$

где V_B, $V_{\text{Н}}$, $V_{\Г}$ - удельные расходы воды, нефти и газа соответственно.

Часто используют коэффициенты **относительной** фазовой проницаемости, которые определяют как отношение коэффициента фазовой проницаемости к коэффициенту абсолютной проницаемости в процентах. Например, коэффициент относительной Фазовой проницаемости воды ($\overline{\text{К}}_{\text{пр.в}}$) запишется: $\overline{\text{К}}_{\text{пр.в}} = (\frac{\text{К}_{\text{пр.в}}}{\text{К}_{\text{пр}}})$ 100 %.

Фазовая проницаемость отличается рядом особенностей, которые мы проиллюстрируем примером двухфазной смеси вода-нефть (Рис.2.10). На рис. Представлены зависимости коэффициентов относительной фазовой проницаемости ($\overline{\text{К}}_{\text{пр.в}}, \overline{\text{К}}_{\text{пр.н}}$) от соотношения фаз.
Последнее выражено через коэффициент вод насыщенности порового пространства ($\text{К}_{\text{В}}$) — отношение объема воды в поровом пространстве к объему пор. Полагаем, что все поровое пространство заполнено смесью вода—нефть, следовательно коэффициент нефтенасыщенности $\text{К}_{\text{Н}}$=1 -$\text{К}_{\text{В}}$. Отметим:

1) Графики зависимостей имеют в целом вогнутость вниз, т.е.

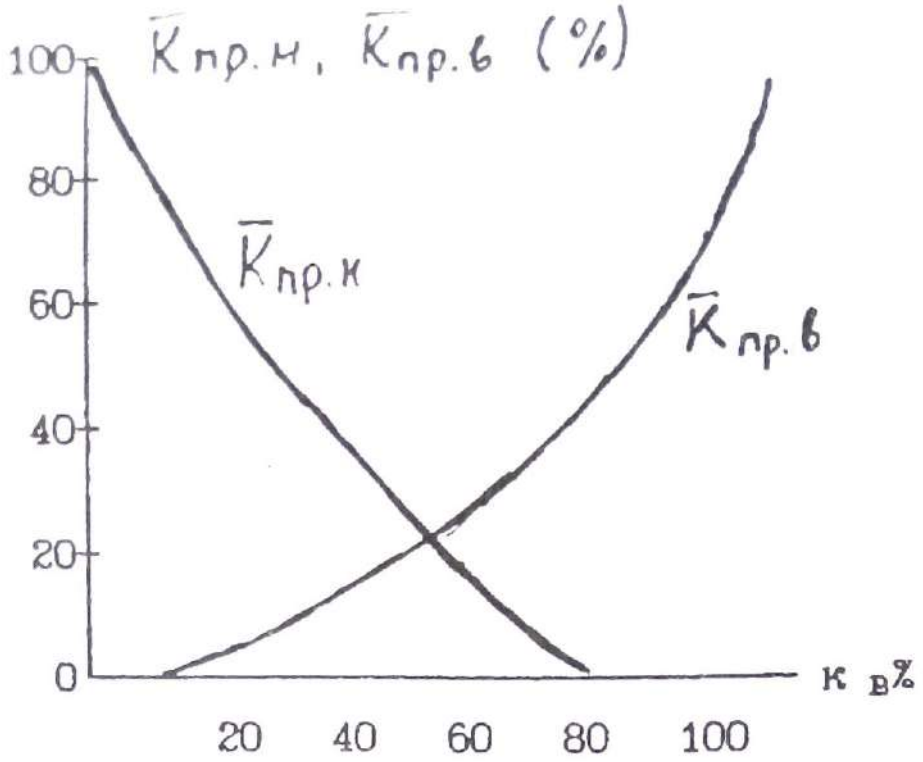


Рис.2.10. Зависимость коэффициентов относительной проницаемости по воде (Кпр.в) и нефти (Кпр.н) от соотношения фаз в смеси вода нефть

сумма Кпр.в+кПр.н<100. Смеси фильтруются хуже, чем однородные жидкости.

2) При определенном соотношении фаз возможен расход какой-либо одной фазы (при $К_В$ < 20% вода не фильтруется через породу, а при $К_В$ > 80%; не Фильтруется нефть).

3. ПЛОТНОСТНИЕ СВОЙСТВА

Эта группа свойств определяет возможность применения ряда геофизических методов. Например, гравиразведки для изучения геологических структур, поисков и разведки полезных ископаемых, ядерно-геофизическиих методов (гамма—гамма-каротаж) для расчленения разрезов скважин.

3.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЁДШНИЯ

Плотность - это масса единицы объема вещества. **Удельный вес** - вес единицы объема вещества. По определению плотность (δ):

$$\delta = \frac{m}{V}, (3.1)$$

Удельный вес (Δ):

$$\Delta = \frac{P}{V}, \quad (3.2)$$

где m, P, V - соответственно масса, вес и объем вещества. Так как P=mg (g- ускорение силы тяжести), то плотность это константа а удельный вес зависит от силы тяжести. В системе си единицей плотности является кг/м^3 удельного веса - Н/м^3. В системе СГС единица массы — грамм (г), внесистемная единица веса граммсила (Г) единицы объема - см^3. Плотности в системе СГС (г/см^3) и удельный вес во внесистемных единицах (Г/см^3) численно совпадают на поверхности Земли с точностью до 0.2-0.4% (изменения удельного веса связаны с изменениями ускорения силы тяжести по поверхности Земли).

Понятия плотность и удельный вес, строго говоря, применимы для однородных сред. Для неоднородных сред вводятся усредненные характеристики — объемная плотность (δ) и объемный вес (d), которые определяются также по Формулам (3.1 и 3.2). Следует иметь в виду, что при определении объемных параметров размер изучаемого объекта должен быть много больше размеров неоднородностей. Соотношение между единицами в различных системах:

1г/см^3 =1000 кг/м^3, 1Г/см =9810 Н/м^3.

Используют так же понятие **минеральная плотность** (δ_M) — масса единицы объема твердой фазы минерала или горной породы. Следует отметить, что наряду с системой СИ в литературе при описании плотностных свойств широко используется и система СГС, которую мы будем использовать при дальнейшем изложении материала. Кроме того общепринятым является использование терминов плотность и удельный вес вместо объемная плотность и объемный вес.

3. 2 ПЛОТНОСТЬ МИНЕРАЛОВ

Плотность минералов определяется химическим составом, строением электронных оболочек атомов, составляющих различные минералы. а также условиями их образования. Эти факторы определяют соотношение в минералах атомов с различными атомными массами, характер кристаллической связи, конституцию кристаллов. Большая часть породообразующих минералов имеет ионную или ковалентную

форму кристаллической связи, состоят из атомов с низкими средними атомными массами и имеют плотность порядка 2.2 – 3.5 г/см^3,
Среди рудных минералов преобладает ионно-металлическая и ковалетно-металлическая форма связи, часто присутствуют элементы с высокими атомными массами, ЧТО обуславливает повышение плотности до 3.5 — 7.5г/см^3.

Средняя атомная масса основных породообразующим минералов (кварц, полевые шпаты, плагиоклазы, карбонаты) почти постоянна и несколько повышается в пироксенах и железистых оливинах. В связи с этим главным фактором определяющим плотность этих минералов является плотность упаковки атомов в кристаллической решетке. Например каркасные структуры силикатов (кварц, полевые шпаты, плагиоклазы) обуславливают низкую плотность. У цепочечных силикатов (пироксены) плотность выше. Еще выше плотность минералов с островной структурой (оливины). Для породообразующих минералов характерны явления **изоморфизма** и **полиморфизма**. Изоморфизм это изменение состава без изменения структуры кристаллической решетки. Целые группы минералов магматических и метаморфических пород (плагиоклазы, амфиболы, пироксены, оливины, гранаты) образуют непрерывные изоморфные ряды. Например плагиоклазовый ряд начинается с альбита ($NaAl_2Si_3O_8$) с плотностью 2.61г/см^3 и заканчивается анортитом ($CaAlSi_2O_8$) с плотностью 2.76г/см. Соотношение между NA и Ca в ряду может быть любым, при этом образуется непрерывный ряд минералов (олигоклаз, андезин, лабрадор, битовнит) с промежуточными значениями плотности. Увеличение плотности от альбита канортиту связано с более высокой атомной массой Ca (40) по сравнению с Na (23). В тоже время при замещении Na в альбите на К имеем минерал ортоклаз (КА151308) с меньшей плотностью (2.57), хотя атомная масса К (39) выше, чем Na. Это связано с большим ионным радиусом К, что обуславливает менее плотную пространственную епаковку атомов. Полиморфизм - это изменение структуры кристаллической решетки без изменения состава. Классическим примером полиморфизма являются минералы графит (плотность 2.2) И алмаз (плотность 3.52). Оба минерала имеют одинаковый состав (С), но графит имеет рыхлую слоистую структуру кристаллической решетки, а алмаз кубическую центрогранную. Полиморфизм особенно характерен для минералов метаморфических горных пород.

Плотность некоторых минералов приведена в таблице 5.

Таблица 5

Минерал	Состав	$\delta\ (\frac{г}{см^3})$
Кварц	SiO_2	2.65
Альбит	$Na[AlSi_3O_8]$	2.61
Анортит	$Ca[Al_2Si_2O_8]$	2.76
Ортоклаз	$K[AlSi_3O_8]$	2.57
Нефелин	$Na[AlSiO_4]$	2.62
Роговая обманка	$NaCa_2(Mg,Fe)_4(Fe,Al)^*$ $(OH,F)_2Al_2Si_6O_{22}$	3.25
Пироксены:		
Авгит	$Ca(Mg,Fe,Al)[(Si,Al)_2O_6]$	3.4
Геденбергит	$CaFe[Si_2O_6]$	3.55
Эгирин	$NaFe[Si_2O_6]$	3.53
Оливин	$(Mg,Fe)_2SiO_4$	3.35
Мусковит	$KAl_2[AlSi_3O_{10}][OH]_2$	2.85
Биотит	$K(Mg,Fe)_3[Si_3AlO_{10}][OH,F]_2$	3.05
Серпентенит	$Mg_6[Si_4O_{10}][OH]_8$	2.55
Кальцит	$CaCO_3$	2.715
Магнезит	$MgCO_3$	2.96
Доломит	$CaMg[CO3]_2$	2.87
Барит	$BaSO_4$	4.5
Гипс	$CaSO_4*2H_2O$	2.3
Ангидрит	$CaSO_4$	2.96
Магнетит	Fe_3O_4	5.11
Ильменит	$FeTiO_3$	4.79
Хромит	$FeCr_2O_4$	4.2
Пирит	FeS_2	5.1
Халькопирит	$CuFeS_2$	4.2
Сфалерит	ZnS	3.95
Галенит	PbS	7.57
Циркон	$ZrSiO_4$	4.68

Приведены средние значения плотности наиболее чистых разновидностей минералов. Можно сделать следующие выводы:

1)Плотности основных породообразующих минералов ниже плотности рудных.

2) Темноцветные породообразующие минералы (пироксены, оливины. роговые обманки) имеют более высокую плотность по сравнению со светлыми минералами (кварц, полевые шпаты, плагиоклазы)

3.3 ПЛОТНОСТЬ ГОРНЫХ ПОРОД

Общее выражение для плотности горной породы можно записать в виде:

$$\delta = \frac{m_T + m_{\text{ж}} + m_{\text{г}}}{V_{\text{Т}} + V_{\text{Ж}} + V_{\text{г}}}, (3.3)$$

где $m_{\text{Т}}$— масса твердой фазы, $m_{\text{Ж}}$— масса жидкой фазы. $m_{\text{Г}}$- масса газовой фазы породы, $V_{\text{Т}}, V_{\text{Ж}}, V_{\text{Г}}$— объемы твердой, жидкой и газовой фаз. Сумма объемов жидкой и газовой фаз равна объему порового пространства. Масса твердой фазы равна сумме масс слагающих породу минералов, а массы жидкой и газовой фаз сосредоточены в поровом пространстве. Тогда выражение (3.3) можно преобразовать к ВИДУ:

$$\delta = (1 - \text{К}_{\text{п}}) \sum \delta_i V_i + \sum \text{К}_{\text{П}} \text{К}_{\text{жк}} \delta_{\text{жк}} + \delta_{\text{г}} \delta_{\text{г}} \qquad (3.4)$$

где $\text{К}_{\text{П}}$ коэффициент пористости, δ_i и V_i - минеральная плотность и объемное содержание в твердой фазе i—го минерала, $\delta_{\text{жк}}$ плотность к—й жидкости. $\text{К}_{\text{ЖК}}$—объемное содержание к—й жидкости в поровом пространстве, $\delta_{\text{Г}}$- плотность газа, $\text{К}_{\text{Г}}$- объемное содержание газа в поровом пространстве. Из 3.4 следует, что плотность горной породы зависит от минерального состава. заполнения порового пространства. Факторов может быть различной.

3.3.1 МАГМАТИЧЕСКИЕ ПОРОДЫ

Общим для магматических пород является их образование путем остывания магматического расплава. Классификация этих пород основана на двух основных признаках: а) условия образования, б) состав. По условиям образования выделяют; 1) **интрузивные** -породы, образовавшиеся при медленном остывании расплава на значительной глубине при низком теплообмене с вмещающими породами. При этом

первичный расплав теряет большую часть летучих компонентов (жидкая и газовая фазы). Формируются низкопористые полнокристаллические породы (см. Таб №4). 2) **Эффузивные –** породы, образовавшиеся при быстром остывании расплава в приповерхностных условиях (на поверхности, под водой, на малых глубинах). Расплав не успевает терять значительную часть летучих. Формируются пористые породы со стекловатой или частично кристаллической структурой. Среди эффузивов выделяют **кайнотипные** – сравнительно молодые породы в значительной степени сохранившие свой первичный облик и **палеотипные** – древние породы, подвергшиеся значительным изменениям (широко известно зеленокаменное изменение эффузивов) минерального состава и структуры. В частности типичными является уменьшение пористости с образованием миндалекаменных структур.

Состав определяется содержанием SiO_2 и номером плагиоклазов (соотношение Ca и Na). Нормальный (щелочноземельный) ряд магматических пород представлен всеми разновидностями от кислых (содержание SiO_2 около 70%), до ультраосновных (содержание SiO_2 около 40%). Щелочной ряд представлен ограниченным набором пород типа сионитов с составом, соответствующим средним -основным породам.

Таблица 6

Порода	$\delta\ (\frac{г}{см^3})$	Порода	$\delta\ (\frac{г}{см^3})$
Гранит фанерозоевский	2.57	Сиенит	2.62
Гранит докембрийский	2.59	Сиенит нефелиновый	2.66
Гранодиорит	2.69	Липарит	2.35
Диорит кварцевый	2.75	Кварцевый порфир	2.60
Диорит	2.81	Андезит	2.49
Габбро	2.95	Андезит-й порфирит	2.73
Пироксенит	3.2	Базальт	2.54
Перидотит	3.2	Диабаз	2.79

В таб. 6 приведены средние значения плотности основных типов магматических пород. По этим данным составлена диаграмма (рис. 3.1) зависимости средней плотности от состава магматических пород. Состав выражен через содержание SiO_2. В нижней части диаграммы приведены названия интрузивных, кайнотипных эффузивных и палеотипных эффузивных пород соответствующего состава.

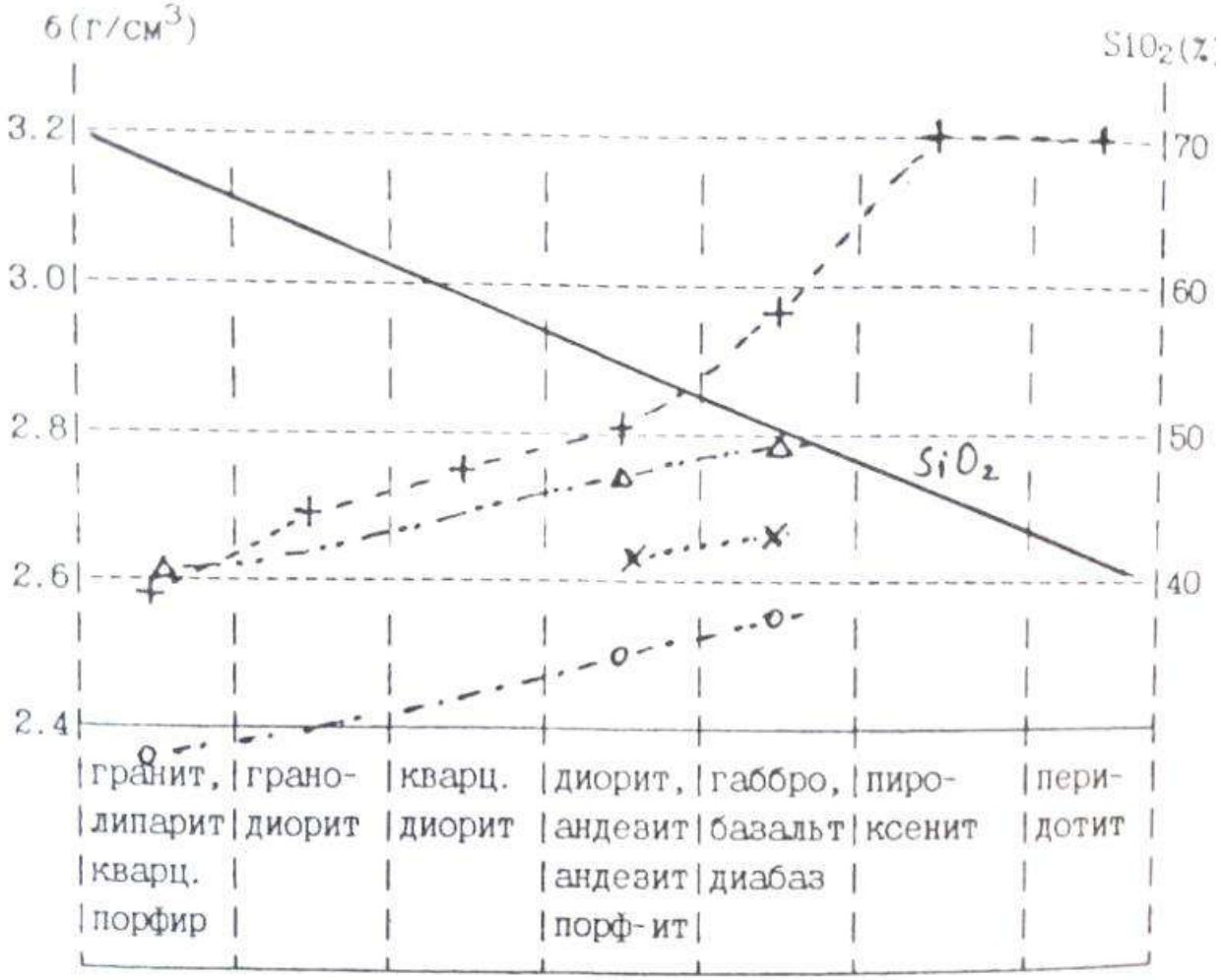


Рис.3.1. Зависимость средней меткости магматических пород от состава. (+ интрузивнне породы щелочноземельного ряда, х интрузивные породы щелочного ряда, о кайнотипные эффузивы, Δ палеотипные эффузивы).

Сделаем основные вывод:

1.Из таблицы и диаграммы следует закономерное возрастание плотности по мере увеличения основности (уменьшения содержания SiO_2), что обусловлено возрастанием количества плотных темноцветных минералов.

2. Разница в средних плотностях между соседними группами по основности составляет около ± 0.1 г/см^3. т.е. является **значимой** (например, позволяет разделять эти породы по уровню гравитационного поля над ними).

3.Графики зависимости плотности от состава интрузивных и палеотиных эффузивных пород практически совпадают. Причина этого – близость составов и пористости. Исключение составляют породы основного

ионного состава. причины этого будут рассмотрены ниже.

4. Бросается в глаза существенно меньшие плотности кайнотипных зффузивов. Причина — высокая пористость.

Вероятные отклонения от средних значений в каждой группе интрузивных и палеотипных зффузивных пород составляют 0.1Г/см^3, у кайнотипных зффузивов 0.15г/см^3. Эти отклонения связаны с влиянием двух основных факторов;

1. В каждой петрографической группе объединены по сути различные породы. Например. среди гранитов выделяют аляскитовые, мусковитовые, двуслюдяные, роговообманковые и т.д. Таким образом, в пределах группы возможны вариации состава породообразующих, минералов и, следовательно, плотности. Так, среди пород типа габбро есть и анортозиты (состоят на 90-95%. из плагиоклаза — лабрадора) с плотностью 2.69 г/см^3, и оливиновое габбро (плагиоклаз и до 20 % оливина) с плотностью 3.07г/см^3.

2.Любая порода, кроме породообразующих, содержит и акцессорные (второстепенные) минералы. В кислых породах это апатит ($\delta = 3.19$), циркон ($\delta = 4.7$), магнетит ($\delta = 5.1$), ильменит ($\delta = 4.79$). В породах основного состава это магнетит, титаномагнетит ($\delta = 4.72$), сульфиды ($\delta = 4.7 - 4.9$). В ультраосновных - магнетит, титаномагнетит. Количество акцессорных минералов может меняться от тысячных долей процента до нескольких процентов, что и приводит к вариациям плотности для ряда районов установлено увеличение содержания акцессорных минералов в рудоносных магматических комплексах, что может служить поисковым признаком.

Процессы автометаморфизма (серпентинизация, амфиболизация) Оказывают существенное влияние на плотность магматических пород. При серпентинизации массивов ультраосновных пород пироксены и оливин преобразуются в серпентин — минерал, содержащий гидроксильную группу. с плотностью 2.55 г/см^3. На рис. 3.2 представлен график зависимости плотности от степени серпентинизации. Нацело серпентинизированные породы имеют плотность, соответствуют кислым магматическим породам, это обстоятельство приходится учитывать при интерпретации данных гравиразведки. дальнейший процесс метаморфизма связан с карбонатизацией, при которой плотность возрастает.

Амфиболизация характерна для пород основного состава и проявляется в преобразовании пироксена в амфиболы и плагиоклазы с выделением хлорита, эпидота, серицита — минералов с меньшей плотностью.

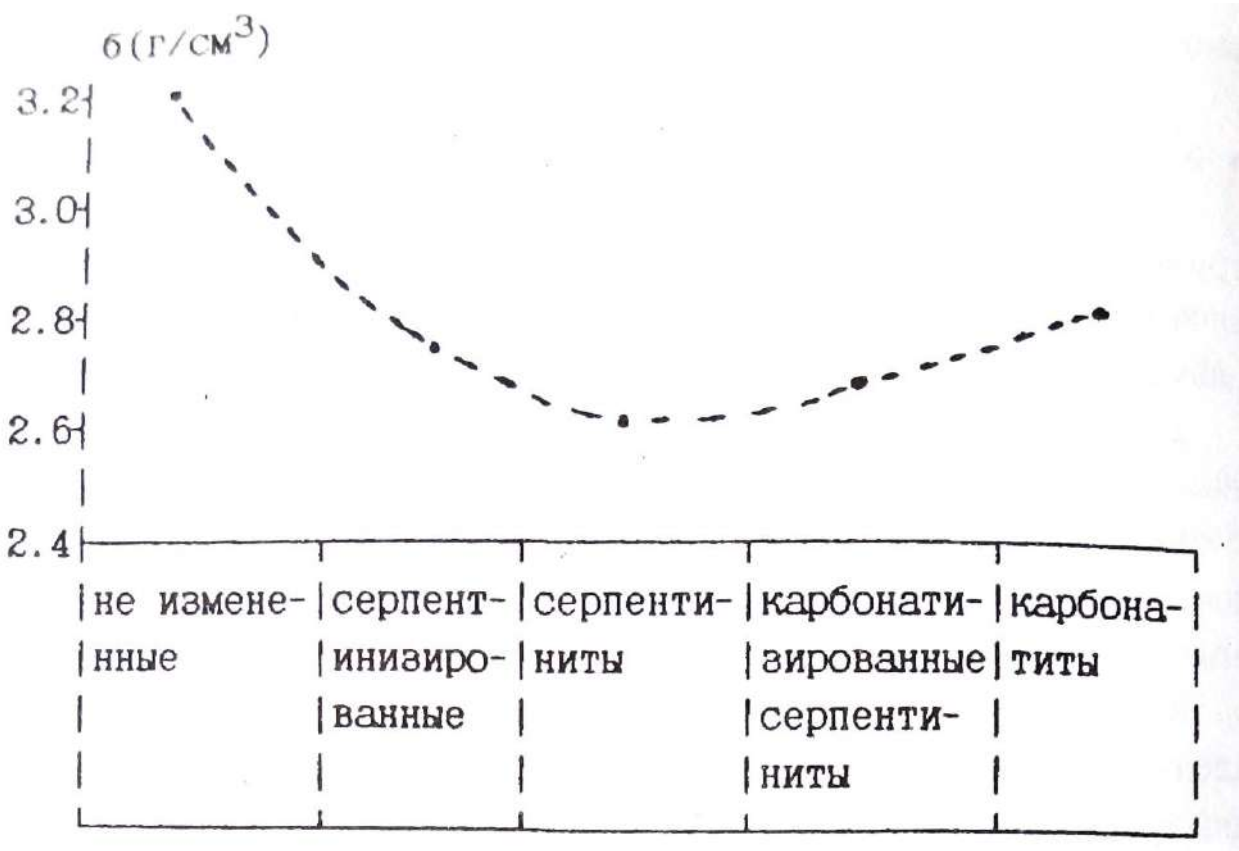


Рис 3.2. Изменение плотности ультраосновных перед
пород в процессе серпентинизации и карбонатизации

Таким образом, амфиболизация сопровождается уменьшением плотности. Обратите внимание, что на рис. 3.1 плотность диапазон меньше плотности их интрузивного аналога — габбро. Диабаз это порода, претерпевшая метаморфические изменения, и её плотность соответствует амфиболизированному габбро. Процессы локального метаморфизма (метасоматоза) могут сопровождаться как уменьшением, так и увеличением плотности. В таблице 7 приведены данные по изменению плотности для типичных процессов.

Таблица 7

Порода	$\delta\left(\frac{г}{см^3}\right)$ измененных	Процесс	$\delta\left(\frac{г}{см^3}\right)$ не измененных
Гранодиорит	2.65	Серицитизация	2.55
Гранодиорит	2.67	Хлоритизация	2.61
Порфирит	2.76	Окварцевание	2.65
Диорит	2.8	Альбитизация	2.63
Гранит	2.6	Грейзенизация	2.77
Порфирит	2.7	Эпидотизация	2.85

Локальные изменения плотности используются как поисковый признак, так как процессы рудообразования сопровождаются локальным метасоматозом.

3.3.2. ОСАДОЧННЕ ГОРНЫЕ ПОРОДЫ

ОБЛОМОЧНЫЕ ОСАДОЧНЫЕ ГОРНЫЕ ПОРОДЫ

В таблице 8 приведены значения минеральной плотности (плотность твердой Фаза) основных типов обломочных пород.

Порода	$\delta_{\text{ср}}\ \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3}\right)$	$\delta_{min}\ \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3}\right)$	$\delta_{max}\ \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3}\right)$
Песчаник	2.67	2.58	2.76
Алевролит	2.69	2.62	2.76
Аргилит	2.68	2.69	2.78
Глина	2.68	2.58	2.78

Отметим близкие значения бар, из чего следует зависимость плотности в основном от пористости и характера заполнения порового пространства. Для водонасыщенных и газонасыщенных пород плотность ($\delta_{\text{В}}, \delta_{\text{Г}}$) соответственно равна:

$$\delta_{\text{В}} = (1 - \text{К}_{\text{П}})\delta_{\text{Т}} + \text{К}_{\text{П}}\,\delta_{\text{Т}} \quad (3.5)$$

$$\delta_{\text{Г}} = (1 - \text{К}_{\text{П}})\delta_{\text{Т}} \quad (3.6)$$

где $\text{К}_{\text{П}}$ - коэффициент пористости, $\delta_{\text{Т}}$- плотность твердой фазы, плотность воды. Учитывая постоянство минеральной плотности, в Обоих случаях имеем линейную зависимость плотности от пористости. На рис. 3.3 приведены зависимости, рассчитанные для $\delta_{\text{Т}}$=2.68г/см^3 и результаты изучения плотности реальных пород. Расчетные и экспериментальные данные достаточно близки. Изменение пористости на 1% приводит к изменению плотности на на 0.03 и 0.02 г/см^3, соответственно для газонасыщенных и водонасыщенных пород. Эти цифры полезно запомнить поскольку они определяют требования к точности измерения плотности геофизическими методами (гамма—гамма каротаж, акустический каротаж) с целью оценки пористости коллекторов.

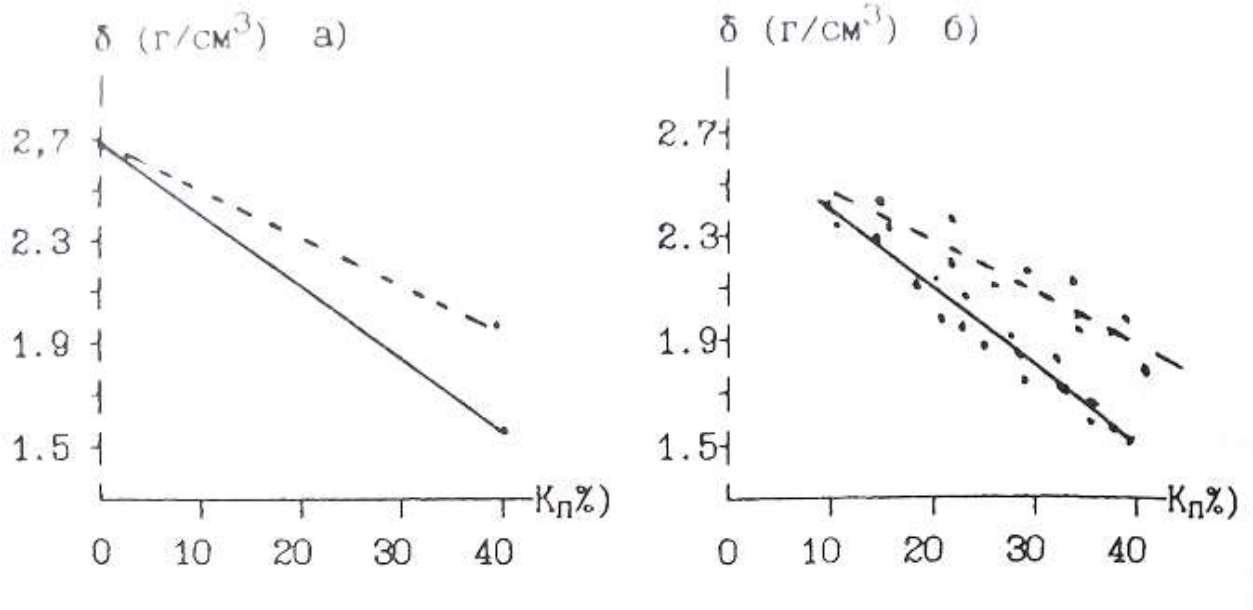


Рис. 3.3. Зависимость плотности обломочных осадочных пород от пористости, а) расчет, б) экспериментальные данные для песчано-глинистых отложении. - водонасыщенные - газонасыщенные

Как отмечалось ранее, в результате уплотнения под нагрузкой вышележащих слоев происходит закономерное уменьшение пористости обломочных пород. Если в выражении 3.5 и 3.6 подставить значения пористости из 2.5, то получим зависимость плотности от глубины залегания:

$$\delta_{\Gamma}(H) = \delta_{\mathrm{T}}(1 - \mathrm{K}_{\mathrm{П}}(0) * \exp(-0.45\,H)) \qquad (3.7)$$

$$\delta_{\mathrm{B}}(H) = \delta_{\mathrm{T}} + \mathrm{K}_{\mathrm{П}}(0) * (1 - \delta_{\mathrm{T}}) * \exp(-0.45\,H) \qquad (3.8)$$

где $\mathrm{K}_{\mathrm{П}}(0)$ - пористость на поверхности, Н — глубина в км.

Таблица 9

Порода	$\delta\left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3}\right)$ пределы	$\delta\left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3}\right)$ наиб. вероят.
Глины	1.20-2.40	-
Аргилиты	1.70-2.90	2.30-2.40
Пески	1.30-2.00	1.50-1.70
Песчаники	2.00-2.90	2.50-2.65
Алевролиты	1.80-2.80	2.30-2.50
Конгломераты	2.10-3.00	-

В таблице 9 приведены значения плотности обломочных осадочных пород. Основные выводы:

1) Плотность обломочных осадочных горных пород (вероятные значения) ниже плотности магматических пород.
2) Плотность меняется в широких пределах. что связано с широким диапазоном возможных значении пористости.
3) Интервалы плотности основных типов обломочных пород в значительной степени перекрываются.

КАРБОНАТНЫЕ ОСАДОЧННЕ ПОРОДЫ

В таб.10 приведены значения минеральной плотности карбонатных пород.

Таблица 10

Порода	$\delta_{\text{ср}}\ \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3}\right)$	$\delta_{min}\ \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3}\right)$	$\delta_{max}\ \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3}\right)$
Мел	2.69	2.56	2.80
Известняк	2.72	2.62	2.80
Доломит	2.80	2.76	2.88
Мергель	2.70	2.58	2.80

Отмечаются значимые различия средних плотностей. Поэтому плотность карбонатных пород будет определяться минеральным составом, пористостью и характером заполнения перового пространства. Представления о плотности этих пород иллюстрируются таб. 11.

Таблица. 11

Порода	$\delta\ \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3}\right)$ пределы	$\delta\ \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3}\right)$ наиб. вероят.
Известняки	1.80-2.90	2.60-2.70
Доломиты	1.90-3.00	2.60-2.80
Мергели	1.50-2.80	2.20-2.40

Для этой группы пород остаются справедливым пункты 2 и 3 выводов, которые получены для обломочных пород. Дополнительно отметим более высокую плотность известняков и доломитов, которая близка к плотности кислых и средних магматических пород.

ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ОСАДОЧНЫЕ ПОРОДЫ ,

Для этих пород характерна низкая пористость, и их плотность в основном определяется минеральным составом. Плотность гипсов лежит в пределах 2.10 — 2.50 г/см^3, ангидритов 2.50—2.90 г/см^3, каменной соли 2.15 — 2.30 г/см^3. Приведем пример соотношения плотностей осадочных комплексов с вытекающими из этого особенностями геофизических полей. Среди структур, вмещающих углеводородное сырье. существуют так называемые диапировые структуры или структуры протыкания. Они образуются в результате выжимания ("Всплывания") соляных куполов сквозь толщ обломочных осадочных пород. Соотношение плотностей приведено на рис. 3.4 а).

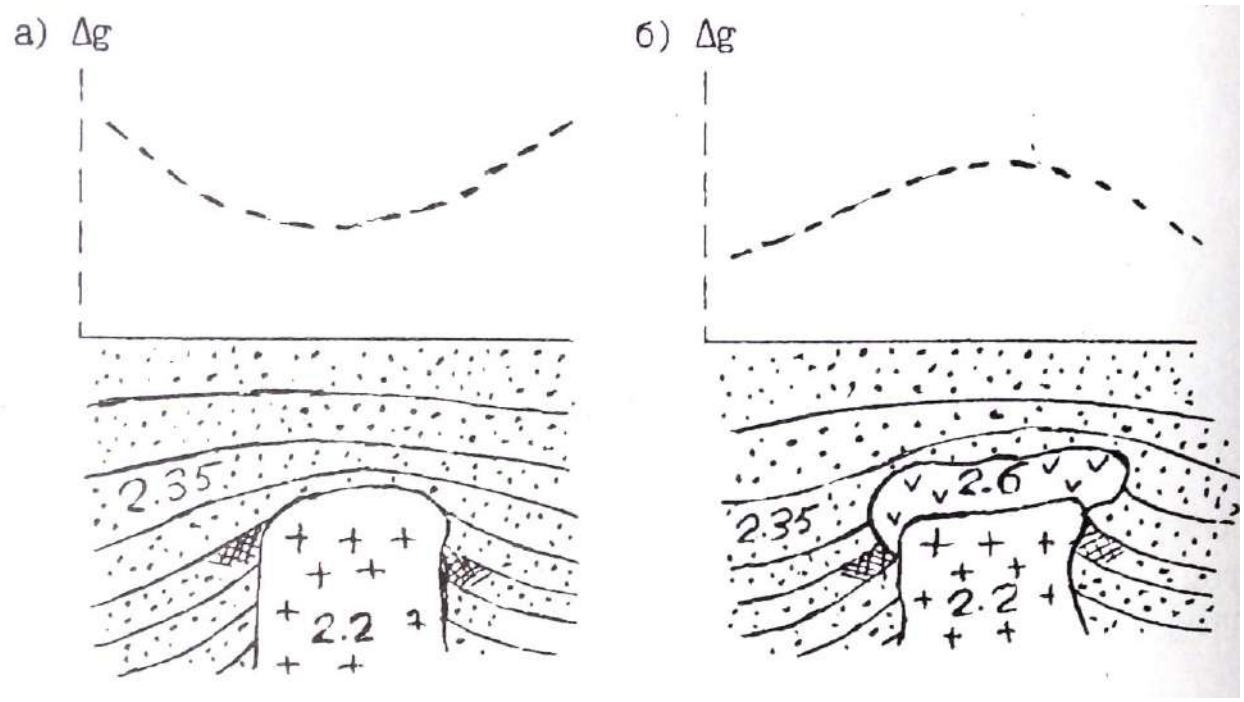


Рис. 3.4. Характер распределения плотности и ускорение силы тяжести над соляно-купольными структурами (песчано-глинистые отложения, + - каменная соль, — ангидритн, - приращениеускорения силы тяжести, - нефтеносность)

Плотность каменной соли (2.20 г/см^3) меньше плотности песчано-глинистых отложении (2.35 г/см^3). Это обуславливает недостаток масс соляного куполам над структурой наблюдается Уменьшение силы тяжести (Кривая Δg,рис.3.4. а)). Однако, возможно и более сложное строение соляных куполов (рис.3.4. б)). В верхней части купола образуется покрышка сложенная ангидритами ("каменная шляпа") с плотностью 2.60 г/см^3.

Избыток масс покрышки может превосходить действие недостатка масс соляного купола, и над структурой наблюдается увеличение силы тяжести. Возможно ситуация баланса этих двух факторов, и над структурой существенного изменения гравитационного поля не будет.

3.3.3. МЕТАМОРФИЧЕСКИЕ ПОРОДЫ

Метаморфические породы образуются в результате регионального (охватывающего значительные площади и объемы пород) преобразования магматических и осадочных пород под действием высокой температуры и давления. В основу классификации метаморфических пород положены условия (фация) метаморфизма, структурно-текстурные особенности и состав породы. В порядке возрастания термодинамических условии выделяют следующие фации: зеленых сланцев. эпидот-амфиболитовую, амфиболитовую, гранулитовую, эклогитовую. В начальный этап регионального метаморфизма происходит уплотнение первичных осадочных пород в результате уменьшения пористости под действием давления (катагенеза). В фацию зеленых сланцев наблюдается некоторое разуплотнение исходных магматических и подвергнутых катагенезу осадочных пород в результате образования минералов, содержащих кристаллизационную и конституционную воду. Дальнейший метаморфизм сопровождается увеличением плотности за счет полиморфных преобразовании минералов. Образуются новые минералы с уплотненными кристаллическими решетками. данные о плотности метаморфических пород Приведены в таблице 12. При общем закономерном возрастании плотности с увеличением степени метаморфизма, в пределах каждой отмечаются существенные колебания плотности, что отражает влияние минерального состава пород. Интересно отметить, что при так называемом ультраметаморфизме (протекает в условиях относительно пониженного давления и высоких температур, сопровождается полной перекристаллизацией и частичным расплавлением пород) отмечаются существенное уменьшение плотности. Так амфиболиты (3.0 г/см^3) преобразуются в метасоматические граниты (2.6 г/см^3). Процесс гранитизации сопровождается кремний-калиевым метасоматозом с преобразованием плотных минералов (амфиболы, гранаты, биотит) в менее плотные (кварц, микроклин).

Таблица 12

Фация	Порода	$\delta_{\text{ср}}\ \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3}\right)$	$\delta_{min}\ \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3}\right)$	$\delta_{max}\ \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3}\right)$
Зеленых сланцев	Филит	2.45	2.40	2.70
	Сланец:			
	Кварцево-серицитовый	2.57	2.50	2.64
	Кремнистый	2.60	2.58	2.62
	Хлоритовый	2.76	2.72	2.80
	Слюдистый	2.65	2.60	2.75
Эпидот-амфиболитовая	Сланец кристаллический:			
	Биотитовый	2.63	2.62	2.63
	Роговообманковый	2.77	2.75	2.80
	Кварцит	2.64	2.62	2.65
	Мрамор	2.70	2.68	2.72
Амфиболитовая	Гнейс:			
	Биотитовый	2.63	2.60	2.68
	Амфиболовый	2.78	2.75	2.82
	Амфиболит:			
	Полевошпатовый	2.87	2.80	2.95
	Гранатовый	3.10	3.00	3.20
Гранулитовая	Гранулит гиперстеновый	2.72	2.60	2.85
	Сланец	3.05	2.90	3.25
Эклогитовая	Эклогит	-	3.20	3.40

3.3.4. ВЛИЯНИЕ ВЫВЕТРИВАНИЯ НА ПЛОТНОСТЬ ГОРНЫХ ПОРОД.

Процессы гипергенеза в результате химического и механического выветривания приводят к существенному изменению состава и состояния пород. Образуется вторичная пористость в результате растрескивания и выщелачивания, которая достигает 20-30%.

Образующиеся коры выветривания глинисто-слюдистого и хлорито-гюдрослюдистого состава с гидроокислами железа, обломками кварца, микроклина, биотита имеют пониженную плотность порядка 2.1-2.5 г/см^3.

Вопросы для самопроверки:

1. *Какие причины создают неоднородность физический свойств горных пород?*
2. *Как строятся гистограммы распределения физический свойств горных пород?*
3. *Типы пористости.*
4. *Какие факторы определяют пористость обломочных пород?*
5. *Назовите группы пород с низкой и повышенной пористостью.*
6. *Как изменяется пористость с глубиной?*
7. *Что такое влажность и влагоемкость?*
8. *В каком виде присутствует вода в горных породах?*
9. *Какими особенностями обладает связанная вода?*
10. *Что такое проницаемость?*
11. *Отличие физической проницаемости от фазовой?*
12. *Как классифицируются породы по проницаемости?*
13. *Как образуется двойной электрический слой?*
14. *Каким параметром характеризуется нефтенасыщенность?*
15. *Что такое плотность и минеральная плотность?*
16. *От чего зависит плотность минералов?*
17. *Назовите основные факторы, определяющие плотность магматических (инрузивных и эффузивных) и осадочных (обломочных, карбонатных и гидрохимических) пород.*
18. *Рассчитайте плотность водонасыщенного и газонасыщенного печсчаника с коэффициентом пористости 25%.*

Литература:

1. В.М. Добрынин, В.Ю. Вендельштейн, Д.А. Кожевников. Петрофизика: Учебник для вузов. -М: Недра, 1991.
2. В.Н. Кобранова. Петрофизика: Учебник для вузов -М: Недра, 1986.

Оглавление

Введение……..... 3
1. Статистическая природа физических свойств……..... 4
2. Коллекторские свойства……..... 8
2. 1. Пористость..... 9
2.1.1. Классификация пор……..... 10
2.1.2. Пористость обломочных осадочных пород……..11
2.1.3. Пористость карбонатных осадочных пород……....14
2.1.4. Пористость гидрохимических осадочных пород.....15
2.1.5. Пористость магматических и метаморфических пород.....15
2.1.6. Пористость гидротермально измененных пород….....16
2.2. Влажность, влагоемкость…….....17
2. 3. Проницаемость 19
2.3.1. Физическая проницаемость 19
2.3.2. Связь коэффициента проницаемости с коэффициентом пористости и структурой перового пространства……..20
2.3.3. Фазовая проницаемость 23
3. Плотностные свойства 24
3.1. Основные понятия и определения 24
3.2. Плотность минералов 25
3.3. Плотность горных пород 28
3.3.1. Магматические породы 28
3.3.2. Осадочные породы 33
3.3.3. Метаморфические породы 37
3.3.4. Влияние выветривания на плотность пород 38
Вопросы для самопроверки 39
Литература 39

Игорь Иванович Бреднев

ПЕТРОФИЗИКА

Часть 1. Коллекторские и плотностные свойства горных пород

Учебно-методическое пособие по дисциплине «Петрофизика» для студентов профилизации «Геофизические методы поисков и разведки МПИ» (РФ)направления 650200 «Технологии геологической разведки»

Конспект лекций

Корректура кафедры геофизики

Подписано в печать 09.09.2004г.
Бумага писчая. Формат бумаги 60х84 1/16.Печать на ризографе.
Печ.л. 2,8. Уч-изд. л. 2,39. Тираж 100 экз. Заказ №130.

Издательство УГГГА
620144. г. Екатеринбург. УЛ- Куйбышева 30
Уральская государственная горно-геологическая академия
Лаборатория множительной техники

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

Виноградов В.Б.

ГЕОМЕТРИЗАЦИЯ И АНАЛИЗ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Екатеринбург

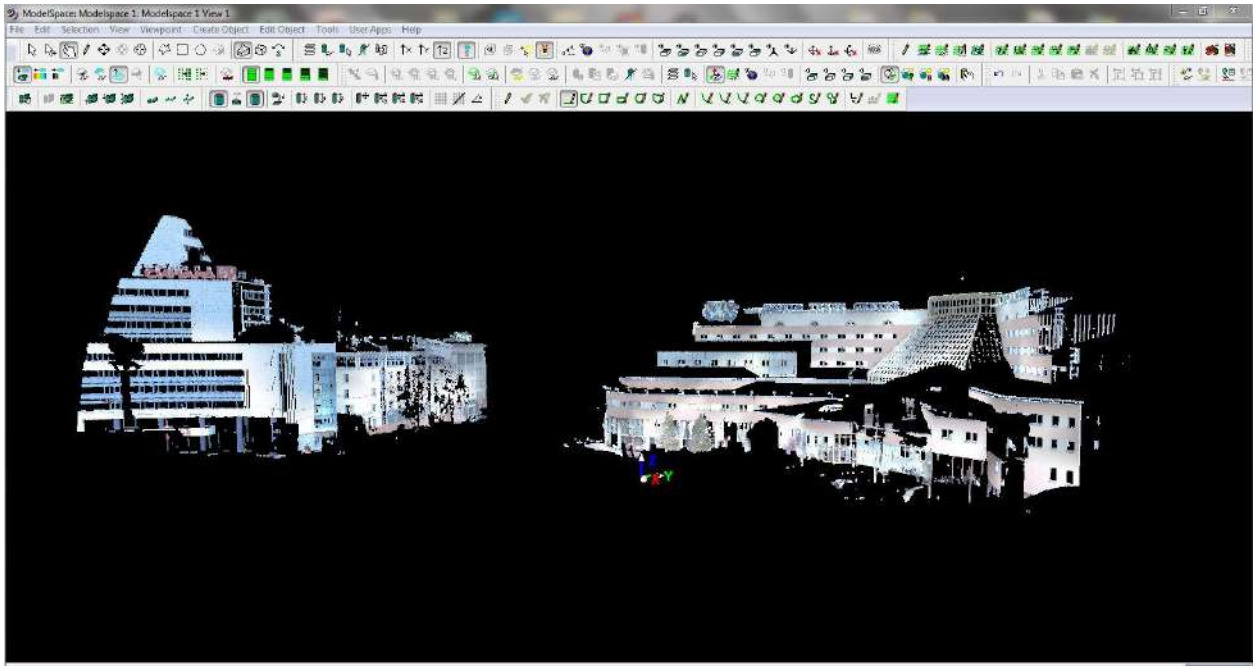
2020

Введение.

Цели, задачи и объекты дисциплины. Ознакомиться с методами геометрии, применяемыми в геофизической практике. Ознакомиться с алгоритмами, программами и математическими пакетами, используемыми при построении карт и разрезов.

Термин «Геометризация» в нашей отрасли имеет крайне широкое толкование. В широком смысле применение методов геометрии в геологии и горном деле. Часто его толкуют как описание геологических поверхностей, поверхностей карьеров и иных горных выработок на основе инструментальных измерений, а также теорию и набор технологий подсчета запасов. Геометризация это непрерывный процесс, отражающий степень изученности объекта. По мере поступления новых данных расчеты проводятся заново. На основе геометрической модели при проведении разведки корректируется сеть скважин.





Основным отчетным материалом проведенных геофизических съемок является карта. В инструкциях по каждому геофизическому методу детально прописано, каким требованиям должна удовлетворять отчетная карта (сечение, раскраска, вид изолиний, масштаб и т.д.), как должна выглядеть отчетная карта, указано с помощью каких специализированных пакетов. Более сложная задача построения геологических поверхностей по геофизическим данным. По данным ГИС строят поверхности ВНК, ГНК, ГВК, кровли резервуара, подошвы резервуара, поверхности тектонических нарушений, поверхности несогласия. Нередко строят карты параметров: пористости, эффективной нефтенасыщенной мощности, плотности и др. Для рудных месторождений строят поверхности рудных тел, карты ЗМС и т.п.

Одна из задач количественной интерпретации – определение геометрии источников поля, особенно их верхней кромки. Для разработки месторождений строительных материалов – это главная задача.

Результат существенно зависит от знания пространственной изменчивости свойств, учета расположения точек на площади, по которым они определены. Если точка определения концентрируются в подобластях, то и средние значения, и дисперсии могут оказаться ошибочными.

Геометрия сети наблюдений. Сеть наблюдений обычно представляет множество более - менее регулярно расположенных на земной поверхности пунктов наблюдений. С одной стороны пункты относятся к поверхности, т.е. к двумерному множеству. Для описания движения автомобиля достаточно указать две координаты. Например, на шаре достаточно указать две координаты. С другой стороны при описании местоположения пунктов наблюдений обычно мы используем третью координату – высоту, так как рельеф меняет рисовку карты.

Сеть наблюдений принято представлять в виде множества многоугольников. Очень часто сеть пунктов наблюдений представляют в виде триангуляционной сети – множества треугольников. Шаг измерений, расстояние между профилями оказывают определяющее влияние на качество построенных карт. Этому влиянию необходимо давать количественную оценку.

Геометризация и анализ физических полей. Геометризация геологических объектов проводится в несколько этапов:

- измерение
- создание базы данных
-создание цифровой модели геологического объекта
- сопровождение модели.

В разведочной геофизике строят не только карты изолиний, но и карты векторов поля. В гравиразведке с 20-х годов 20 века по 70-е годы 20 века строили карты проекции вектора поля на горизонтальную плоскость V которые измеряли с помощью вариометров и градиентометров.

Особенность магниторазведки в том, что намагниченность горных пород – вектор и магнитная индукция – вектор. В магниторазведке измерения с феррозондовыми магнитометрами позволяли получить все три компоненты вектора индукции. Сотрудники НГУ по результатам работ с таким прибором построили карты во всех возможных вариантах, и даже карты аномальных склонений и наклонений.

По результатам микромагнитной съемки строят карты векторов. Анализ направлений векторов позволяет судить о преимущественном направлении трещин на территории съемки. Разработана методика построения роз-диаграмм направлений изодинам. Эта методика применяется сейчас в обработке площадных съемок.

Измерение векторов полей считается перспективным направлением в разведочной геофизике. Внедрение инерциальных магнитометров приведет в возобновлению построения карт векторов. Интерпретация таких карт проще, чем карт проекций, поскольку вектор поля направлен в к источнику поля. Векторная магнитометрия в скважинах нередкое явление.

Создание пространственной модели проводится в несколько этапов. Для получения результата необходима длительная кропотливая работа. Обязательно нужно оценивать надежность и точность используемой информации. На схеме показаны возможные виды работ и последовательность операций.

Обе перечисленные выше задачи относятся к категории задач восстановления. функций по эмпирическим данным. Естественно необходимо оценить качество восстановления. Помимо близости значений в отдельных точках вводится критерий близости функций:

1. Расстояние между функциями в смысле среднеквадратического уклонения:

   $R(f_1.f_2)=\sqrt{\int\left(f_1(x)-f_2(x)\right)^2 P(x)dx}$,

   где $P(x)$- неотрицательная функция , такая, что $\int P(x)dx=1$.

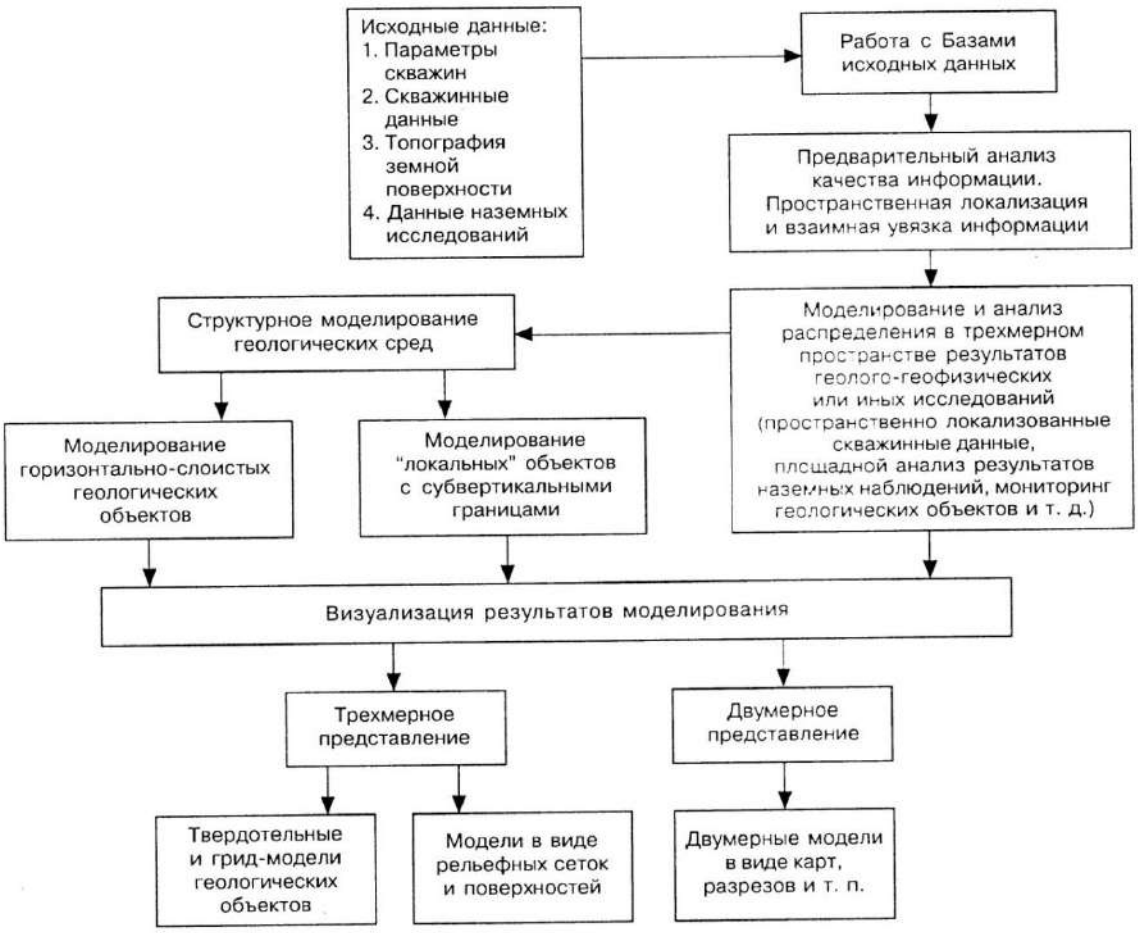
2. Расстояние в смысле равномерного уклонения :

   $R(f_1.f_2)=\sup_{\chi}\left|f_1(x)-f_2(x)\right|\le\chi$.

   Вторая метрика сильнее, чем первая, т.е. если справедливо (2) то (1) выполняется.

   Выбор меры близости определяется содержательной постановкой задачи.

   После проведения полевых работ наступает этап обработки, стоимость которой непрерывно возрастает. Ниже представлена схема обработки информации:



ЛЕКЦИЯ 2 ГЕОМЕТРИЯ СЕТЕЙ НАБЛЮДЕНИЙ

Геометрия сети измерений оказывает существенное влияние на результаты работ. Как правило, стремятся к наблюдениям в узлах квадратной сети или иной правильной геометрической сети. Исходя из экономических соображений, как правило, сеть измерений прямоугольная. В процессе полевых работ на местности по разным причинам приходится отступать от проекта. Фактически сеть наблюдений квазирегулярная.

Маршрутные наблюдения проводятся вдоль некоторой линии, как правило, по пути легкого передвижения, вдоль дорог, с невысокими превышениями и т.д. Линия маршрута в этом случае, особенно при использовании навигатора, существенно отклоняется от прямой. В этом случае значения поля переносят на прямую линию профиля. Оценить ошибки восстановления поля очень трудно. Ценность таких наблюдений невысокая. Маршрутные измерения выполняют для оценки характера поля.

Сети наземных полевых измерений. Сеть пространственных наблюдений в скважинах и шахтах.

Определение координат пунктов геофизических измерений в настоящее время проводится с очень высокой точностью и трудностей не вызывает. Однако неизбежные отклонения от проекта изменяют геометрию сети измерений. Неравномерность сети оказывает значительное влияние на надежность выявления аномалий. При существенной неоднородности сети пунктов и случайных ошибках измерений появляется неустойчивость результатов интерполяции. Из-за особенностей алгоритма восстановления функции (интерполяции) на карте могут появиться ложные аномалии или сильно искажаться реальные аномалии. И, наоборот, из-за сильного сглаживания, на карте могут не появиться реальные аномалии.

ЛЕКЦИЯ 3 Построение карт

Геометрия сети наблюдений. Как правило, стремятся к наблюдениям в узлах квадратной сети или иной правильной геометрической сети. Исходя из экономических соображений, как правило, сеть измерений прямоугольная. В процессе полевых работ на местности по разным причинам приходится отступать от проекта. Фактически сеть наблюдений квазирегулярная.

Маршрутные наблюдения проводятся вдоль некоторой линии, как правило, по пути легкого передвижения, вдоль дорог, с невысокими превышениями и т.д. Линия маршрута в этом случае, особенно при использовании навигатора, существенно отклоняется от прямой линии. В этом случае значения поля переносят на прямую линию профиля. Оценить ошибки восстановления поля

очень трудно. Ценность таких наблюдений невысокая. Маршрутные измерения выполняют для оценки характера поля.

Сети наземных полевых измерений. Сеть пространственных наблюдений в скважинах и шахтах.

Определение координат пунктов геофизических измерений в настоящее время проводится с очень высокой точностью и трудностей не вызывает. Однако неизбежные отклонения от проекта изменяют геометрию сети измерений. Неравномерность сети оказывает значительное влияние на надежность выявления аномалий. При существенной неоднородности сети пунктов и случайных ошибках измерений появляется неустойчивость результатов интерполяции. Из-за особенностей алгоритма восстановления функции (интерполяции) на карте могут появиться ложные аномалии или сильно искажаться реальные аномалии. И, наоборот, из-за сильного сглаживания, на карте могут не появиться реальные аномалии.

Построение карт проводится по результатам измерений (геофизические поля) и наблюдений (геологические объекты). Карты могут быть представлены в виде изолиний или проекций векторов на горизонтальную или вертикальную плоскость (рис. 1). Чтобы правильно оценить надежность карты рассматривают расстояния между пунктами, плотность распределения пунктов на площади, характер распределения пунктов (регулярное, равномерное, случайное, групповое).

Гипотезу о равномерности пунктов измерений на территории проверяют с помощью критерия хи-квадрат:

$$\chi^2 = \sum_{1}^{N} \frac{(o_i - E)^2}{E}.$$

Гипотезу о случайном распределении точек проверяют с помощью критерия Пирсона:

$$\Pr = \frac{e^{\gamma}\gamma^{r}}{r!}.$$

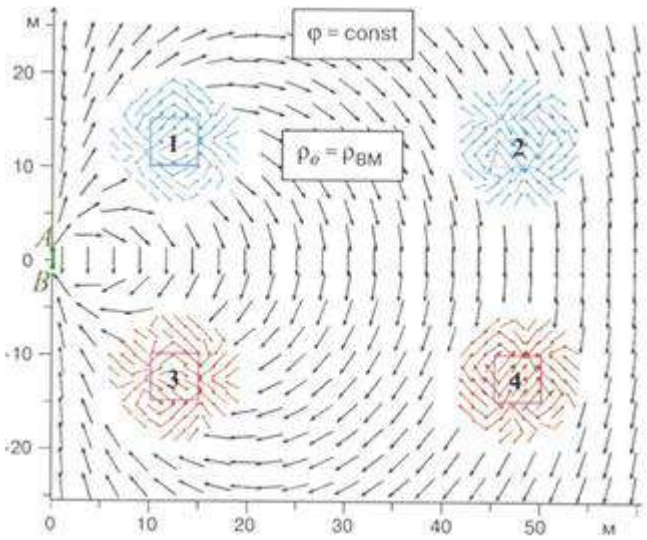


Рис. 1 Карта векторов

Метод ближайшего соседа предназначен для изучения характера распределения подобластей (точек), на которые разделена изучаемая территория. Математическое ожидание расстояния между N точками на территории площадью S равно:

$$D = \frac{\sqrt{S}}{2\sqrt{N}}.$$

Обозначим среднее расстояние между соседними точками на территории d. Величина:

$$R = \frac{d}{D},$$

Является статистикой метода ближайшего соседа. Ее значение меняется от 0 до 2,15. R=2,15 соответствует расположению точек в вершинах шестиугольников (регулярному размещению точек). Критерием проверки о случайном расположении точек служит величина:

$$Z = \frac{(d - D)\sqrt{nN}}{0.26136\sqrt{S}},$$

где n – число измерений расстояний между точками. Величина Z распределена по нормальному закону.

Геофизические карты отражают распределение функций, которые мы считаем непрерывными и гладкими (имеющими в каждой точке поверхности измерения производную). Нередко приходится анализировать структурные карты геологических поверхностей (баженовская свита), которые построены по редкой сети скважин. Геологическая карта, несет отпечаток представлений автора о геологической истории территории.

До появления ЭВМ карты изолиний поля строили вручную. Качество карты зависело от квалификации техника, который ее строил. Эту карту редактировал и утверждал старший геофизик партии. В то время не было необходимости

преобразования измеренных значений в узлы регулярной сети. Построение осуществляли по нерегулярной сети. Карта отражала субъективное мнение автора. Т.е. разные авторы строили разные карты по одним и тем же измерениям.

С появлением ЭВМ задача построения карты решается, как правило, с помощью ЭВМ. Экономический эффект применения ЭВМ для построения карт велик, время на создание карт уменьшилось в сотни раз. Построение карт с помощью математических пакетов считают объективным, однако легко убедиться, что карты, построенные с помощью разных программ и математических пакетов, различаются. Алгоритм построения карты включает предположение автора алгоритма о закономерностях поведения поля. Интерполяция между пунктами наблюдений проводится, как правило, на основе полиномиального представления изучаемой функции и непрерывности производных изучаемой функции.

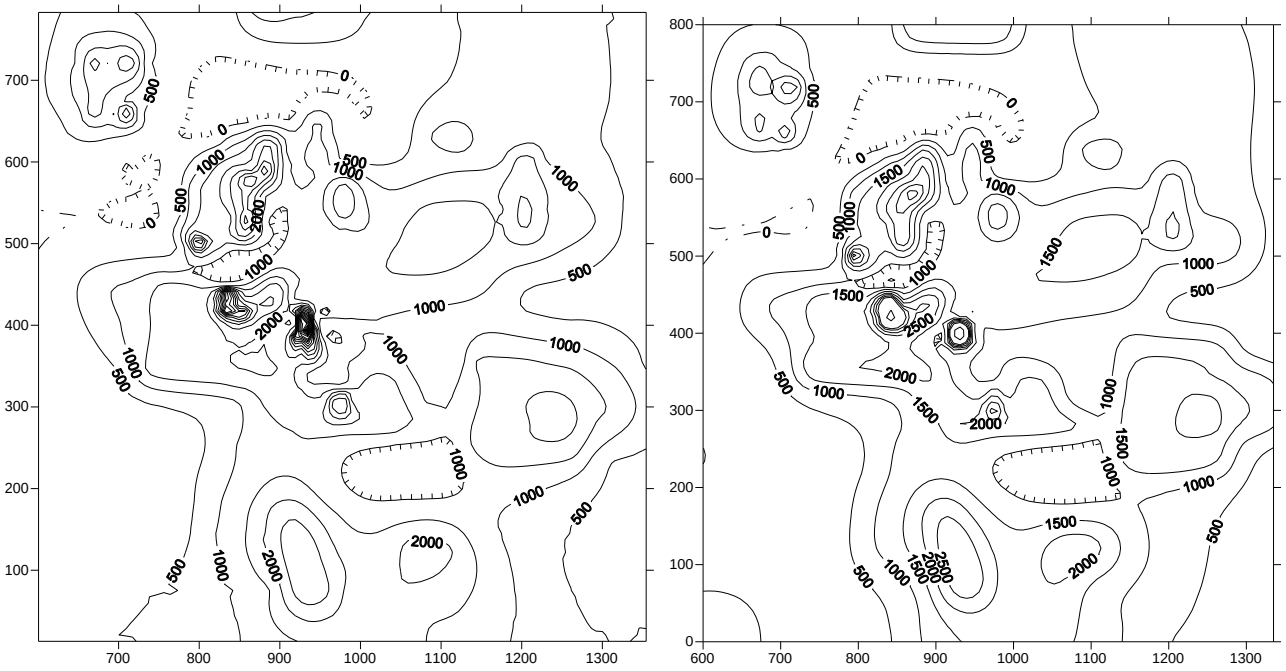
Как правило, ЭВМ сначала проводит интерполяцию измеренных значений поля в узлы квадратной сети (грид-файлы), а затем строит по этим значениям карту. В отличие от карт, построенных вручную, в математических пакетах предусмотрено вычисление погрешности построения изолиний. Специализированные пакеты основаны на алгоритмах, учитывающих свойства поля (гладкость, характер убывания с удалением от объекта и т. д.) и требования инструкции для соответствующего метода разведочной геофизики. В некоторых инструкциях указаны пакет и его версия, в которой необходимо строить карту поля. Их нельзя применять для построения других карт. Например, топографические карты изолиний содержат разрывы (отвесная скала), а производные геофизические поля непрерывны и бесконечное число их производных. Изображение аномалии на карте зависит от рельефа местности. Поэтому на картах нередко приводится упрощенное изображение топографической ситуации.

Инструкция предписывает, при построении графиков погрешность измерений на нем не может отображаться отрезком длиной более 1 мм. Это требование служит для того, чтобы при визуальном восприятии ошибки не казались аномалией. По той же причине на картах изолиний сечение не может быть меньше 2,5 погрешностей измерений. В этом случае на картах гарантировано не появятся аномалии (замкнутые изолинии), обусловленные ошибками измерений. Отчетная карта строится в масштабе съемки. На участках, где сеть измерений не обеспечивает надежной межпрофильной корреляции, изолинии поля не строят. При построении карт трансформаций также необходимо соблюдать требования инструкции. Оформление карт

магнитного поля масштабов 1:50000 и 1:25000 и карт силы тяжести масштабов 1:50000 и 1:20000 проводится по специальным инструкциям.

При построении карт от источников, подобранных в результате решения обратной задачи, расчет поля проводят в узлах регулярной сети. Если для тех же источников вычислить поле в пунктах измерений, вид карты будет иным. Сеть расчета для прямой задачи не может быть более густой, чем сеть наблюдений (рис. 1).

Для построения карты поля создают набор данных, содержащий плановые координаты и высоту пункта измерения, а также измеренное значение или его преобразование в этом пункте. Получаем матрицу $5\times N$.



а б

Рис. 1 Планы изодинам, построенные по результатам вычислений в точках измерения (а) и в узлах прямоугольной сети (б)

Пусть задана нерегулярная сеть измерений с координатами пунктов $\{x_i,y_i\}$ и измеренные значения в них. Определим набор из n точек соседних с точкой k. Расстояние от точки *k* до точки *1*равно:

$$d_{1k} = \sqrt{(x_{1k} - x_{1i})^2 + (y_{1k} - y_{1i})^2} .$$

Зная расстояния до набора соседних точек, найдем значение искомой функции в точке *k*:

$$T_k = \frac{\sum_1^n \frac{T_i}{d_{ik}}}{\sum_1^n \frac{1}{d_{ik}}} .$$

По этому правилу определим значения поля т в узлах регулярной сети.

Нет ничего практичнее хорошей теории. Было бы неплохо, если бы мы могли дать аналитическое описание измеренных полей, проще говоря, написать

формулу, описывающую измеренное поле. Это во многом бы облегчило дальнейшую обработку измеренных полей, например аналитическое продолжение поля.

На практике встречаются случаи, когда геофизические поля не меняются или меняются незначительно. Такие незначительные отклонения могут быть вызваны ошибками измерения или влиянием объектов небольших размеров, которые нас не интересуют. В этом случае поле с хорошим приближением можно описать выражением:

$$U(x, y) = const.$$

Нередко такую аппроксимацию принимают для региональных и фоновых полей.

Гораздо чаще для описания полей на отдельных площадях и участках применяют линейные функции. Для полей измеренных вдоль прямой линии:

$$U(x) = Ax + B.$$

Эту же функцию можно представить в виде тригонометрического ряда Фурье:

$$U(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{1}^{\infty}(a_n \cos\frac{\pi n x}{L} + b_n \sin\frac{\pi n x}{L},$$

где $a_n = \frac{1}{L}\int_{-L}^{L} U(\xi)\cos\frac{\pi n x}{L} d\xi$, $b_n = \frac{1}{L}\int_{-L}^{L} U(\xi)\sin\frac{\pi n x}{L} d\xi$.

Интерполяция. Через две точки можно провести только одну прямую. Через три точки можно провести параболу, а через четыре точки – кубическую параболу. Далее с увеличением числа пунктов измерения можно повышать степень интерполирующего полинома. График кривой пройдет через все точки. Однако полученная функция не будет отражать реальное поле. Аналитическое описание должно отражать физическое содержание задачи.

Поскольку измерения проведены в дискретных пунктах, на практике используют дискретное преобразование Фурье.

Для описания полей измеренных вдоль линии можно использовать рациональные дроби:

$$U(x) = \frac{Q}{Ax + B}, \quad U(x) = \frac{Q}{Ax^2 + Bx + C}, \quad U(x, y) = \frac{Q}{Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F}.$$

В задачах восстановления функции по значениям заданным на сетке используют экспоненциальные функции:

$$U(x) = a_1 e^{\alpha_1 x} + a_2 e^{\alpha_2 x} + ... + a_M e^{\alpha_M x},$$

где a_j, α_j искомые величины. Экспонента быстро увеличивается с ростом аргумента, поэтому ошибки измерения сильно влияют на результат.

При приближенном описании геофизических полей необходимо учитывать их специфичность. При удалении от источника электрический потенциал убывает обратно пропорционально расстоянию, сила тяжести убывает обратно пропорционально квадрату расстояния, магнитная индукция обратно пропорционально кубу расстояния. Функции приближенного описания гравитационного поля не пригодны для описания магнитного поля. При большой горизонтальной мощности объекта гравитационное поле постоянно, а магнитное поле меняется.

Для полей, измеренных на площади, и меняющихся вдоль одного какого либо направления применяют формулы:

$$U(x,y) = Ax + B,\ \ U(x,y) = Ay + B,\ \ U(x,y) = Ax + By + C.$$

Также часто для изолированных аномалий применяют полиномы невысоких степеней, как правило, не выше 4 степени. Например, уравнение второй степени

$$U(x,y) = Ax^2 + Bxy + Cy^2 + D$$

описывает поверхности: эллипсоиды, двуполостные гиперболоиды, однополостные гиперболоиды, конусы второго порядка, эллиптические параболоиды, гиперболические параболоиды, эллиптические цилиндры (в том числе круговые), гиперболические цилиндры, параболические цилиндры. Других поверхностей быть не может. Форма изолиний соответствует линиям, получаемым в результате сечения этих поверхностей плоскостью.

Уравнение третьего порядка имеет вид:

$$U(x,y) = Ax^3 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Hx + Wy + Q$$

или другие подобные выражения. Чаще всего они используются для описания региональных или фоновых полей. Первое уравнение описывает поверхности

На площади как правило присутствуют несколько аномалий разных размеров и интенсивности. Аномалии накладываются друг на друга, их значения известны только в дискретных пунктах наблюдения. Поле измерено на ограниченном участке. Для аналитического описания таких полей необходимо решить задачу:

- найти непрерывную на заданной площади вместе со своими производными функцию, значения которой в пунктах измерения совпадают с измеренными или отличаются от них на величину меньшую погрешности съемки.

Такую задачу называют аналитической аппроксимацией поля. Стандартное решение разложение в ряд по собственным функциям задачи.

Такое описание двумерной функции на прямоугольной площади с пунктами в узлах прямоугольной сети можно подобрать в виде двойных рядов Фурье. Статические гравитационные и магнитные поля удовлетворяют уравнению Лапласа. Решением уравнения Лапласа является потенциал $W(x,y,z) = e^{-iax-iby-cz}$,

где $c^2 = a^2 + b^2$. Линейная комбинация таких функций с произвольными коэффициентами также будет решением уравнения Лапласа. В том числе решением будет:

$$W(x, y.z) = \frac{1}{4\pi^2} \iint_{P_1} S(a,b) e^{-cz - iax - iby} dadb \qquad (1),$$

где $S(a,b)e^{-cz}$ - преобразование Фурье функции $W(x,y,z)$ относительно переменных x и y. Обратное преобразование Фурье

$$S(a,b) = \iint_{P_0} e^{iax+iby} W(x,y) dxdy \qquad (2).$$

Предположим, что после проведения процедуры интерполяции наблюденных данных получаем значения поля в узлах квадратной сети с шагом Δx. Тогда измеренная гармоническая функция $W(x,y)$ – функция с ограниченным спектром, так как она известна только в узлах квадратной сети со стороной Δx. Поэтому она может быть представлена в виде функции значения которой в узлах совпадают с данными измерений:

$$W(x,y) = \sum_k \sum_n W(k\Delta x, n\Delta x) \frac{\sin \pi(x/\Delta x - k)}{\pi(x/\Delta x - k)} \frac{\sin \pi(y/\Delta x - n)}{\pi(y/\Delta x - n)}.$$

Переход к прямоугольной сети тривиален. Обобщением может служить ряд:

$$U(I,J) = \sum_{i=1}^{\infty}\sum_{j=1}^{\infty} a_{nm} \cos\frac{2\pi n x_i}{L_x} \cos\frac{2\pi m y_j}{L_y} + \sum_{i=1}^{\infty}\sum_{j=1}^{\infty} b_{nm} \cos\frac{2\pi n x}{L_x} \sin\frac{2\pi m y}{L_y} +$$
$$+ \sum_{i=1}^{\infty}\sum_{j=1}^{\infty} c_{nm} \sin\frac{2\pi n x_i}{L_x} \cos\frac{2\pi m y_j}{L_y} + \sum_{i=1}^{\infty}\sum_{j=1}^{\infty} b_{nm} \sin\frac{2\pi n x}{L_x} \sin\frac{2\pi m y}{L_y}.$$

При практических вычислениях ряд не может быть бесконечным, поэтому верхним пределом суммирования будет конечное число. После записи уравнений для всех точек измерения получим СЛАУ для определения коэффициентов ряда.

Общим недостатком всех выше перечисленных способов приближения является то, что они никак не соотносят подобранную функцию с источником поля. В.И. Ароновым предложено использовать в качестве приближающих функций поле материальной точки, Цирульский А.В. – для магнитного поля элементарным источником выбрал поле диполя. Однако и в этом случае переход от аппроксимирующей конструкции к реальным источникам очень затруднен. Е.Г. Булах предложил использовать поля горизонтальных цилиндров и уступов.

Трудности приближения полей одной функцией на участке в целом состоят в том, что значение функции в одной точке определяет поведение функции во всей области приближения. Эти недостатки вынудили обработчиков обратиться к локальному описанию. При таком описании участок делится на подобласти, на которых поле приближают простой функцией. На разных подобластях поле описывают разными функциями.

ЛЕКЦИЯ 4 ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКОВ И КАРТ

Нет ничего практичнее хорошей теории. Было бы неплохо, если бы мы могли дать аналитическое описание измеренных полей, проще говоря, написать формулу, описывающую измеренное поле. Это во многом бы облегчило дальнейшую обработку измеренных полей, например аналитическое продолжение поля.

На практике встречаются случаи, когда геофизические поля не меняются или меняются незначительно. Такие незначительные отклонения могут быть вызваны ошибками измерения или влиянием объектов небольших размеров, которые нас не интересуют. В этом случае поле с хорошим приближением можно описать выражением:

$$U(x, y) = const.$$

Нередко такую аппроксимацию принимают для региональных и фоновых полей.

Гораздо чаще для описания полей на отдельных площадях и участках применяют линейные функции. Для полей измеренных вдоль прямой линии:

$$U(x) = Ax + B.$$

Эту же функцию можно представить в виде тригонометрического ряда Фурье:

$$U(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{1}^{\infty}(a_n \cos\frac{\pi n x}{L} + b_n \sin\frac{\pi n x}{L},$$

где $a_n = \frac{1}{L}\int_{-L}^{L} U(\xi)\cos\frac{\pi n x}{L} d\xi$, $b_n = \frac{1}{L}\int_{-L}^{L} U(\xi)\sin\frac{\pi n x}{L} d\xi$.

Интерполяция. Через две точки можно провести только прямую. Через три точки можно провести параболу, а через четыре точки – кубическую параболу. Далее с увеличением числа пунктов измерения можно повышать степень интерполирующего полинома. График кривой пройдет через все точки. Однако полученная функция не будет отражать реальное поле. Аналитическое описание должно отражать физическое содержание задачи.

Поскольку измерения проведены в дискретных пунктах, на практике используют дискретное преобразование Фурье.

Для описания полей измеренных вдоль линии можно использовать рациональные дроби:

$$U(x) = \frac{Q}{Ax + B}, \quad U(x) = \frac{Q}{Ax^2 + Bx + C}, \quad U(x, y) = \frac{Q}{Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F}.$$

В задачах восстановления функции по значениям заданным на сетке используют экспоненциальные функции:

$$U(x) = a_1 e^{\alpha_1 x} + a_2 e^{\alpha_2 x} + ... + a_M e^{\alpha_M x},$$

где a_j, α_j искомые величины. Экспонента быстро увеличивается с ростом аргумента, поэтому ошибки измерения сильно влияют на результат.

При приближенном описании геофизических полей необходимо учитывать их специфичность. При удалении от источника электрический потенциал убывает обратно пропорционально расстоянию, сила тяжести убывает обратно пропорционально квадрату расстояния, магнитная индукция обратно пропорционально кубу расстояния. Функции приближенного описания гравитационного поля не пригодны для описания магнитного поля. При большой горизонтальной мощности объекта гравитационное поле постоянно, а магнитное поле меняется.

Для полей, измеренных на площади, и меняющихся вдоль одного какого либо направления применяют формулы:

$$U(x,y) = Ax + B,\ U(x,y) = Ay + B,\ U(x,y) = Ax + By + C.$$

Также часто для изолированных аномалий применяют полиномы невысоких степеней, как правило, не выше 4 степени. Например, уравнение второй степени

$$U(x,y) = Ax^2 + Bxy + Cy^2 + D$$

описывает поверхности: эллипсоиды, двуполостные гиперболоиды, однополостные гиперболоиды, конусы второго порядка, эллиптические параболоиды, гиперболические параболоиды, эллиптические цилиндры (в том числе круговые), гиперболические цилиндры, параболические цилиндры. Других поверхностей быть не может. Форма изолиний соответствует линиям, получаемым в результате сечения этих поверхностей плоскостью.

Уравнение третьего порядка имеет вид:

$$U(x,y) = Ax^3 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Hx + Wy + Q$$

или другие подобные выражения. Чаще всего они используются для описания региональных или фоновых полей. Первое уравнение описывает поверхности

На площади как правило присутствуют несколько аномалий разных размеров и интенсивности. Аномалии накладываются друг на друга, их значения известны только в дискретных пунктах наблюдения. Поле измерено на ограниченном участке. Для аналитического описания таких полей необходимо решить задачу: найти непрерывную вместе со своими производными на заданной площади функцию, значения которой в пунктах измерения совпадают с измеренными или отличаются от них на величину меньшую погрешности съемки. Такую задачу называют аналитической аппроксимацией поля. Стандартное решение разложение в ряд по собственным функциям задачи.

Такое описание двумерной функции на прямоугольной площади с пунктами в узлах прямоугольной сети можно подобрать в виде двойных рядов Фурье.

Статические гравитационные и магнитные поля удовлетворяют уравнению Лапласа. Решением уравнения Лапласа является потенциал $W(x,y,z)=e^{-iax-iby-cz}$, где $c^2=a^2+b^2$. Линейная комбинация таких функций с произвольными коэффициентами также будет решением уравнения Лапласа. В том числе решением будет:

$$W(x,y.z)=\frac{1}{4\pi^2}\iint_{P_1}S(a,b)e^{-cz-iax-iby}dadb \qquad (1),$$

где $S(a,b)e^{-cz}$ - преобразование Фурье функции $W(x,y,z)$ относительно переменных x и y. Обратное преобразование Фурье

$$S(a,b)=\iint_{P_0}e^{iax+iby}W(x,y)dxdy \qquad (2).$$

Предположим, что после проведения процедуры интерполяции наблюденных данных получаем значения поля в узлах квадратной сети с шагом Δx. Тогда измеренная гармоническая функция $W(x,y)-$ функция с ограниченным спектром, так как она известна только в узлах квадратной сети со стороной Δx. Поэтому она может быть представлена в виде функции значения которой в узлах совпадают с данными измерений:

$$W(x,y)=\sum_k\sum_n W(k\Delta x,n\Delta x)\frac{\sin\pi(x/\Delta x-k)}{\pi(x/\Delta x-k)}\frac{\sin\pi(y/\Delta x-n)}{\pi(y/\Delta x-n)}.$$

Переход к прямоугольной сети тривиален. Обобщением может служить ряд:

$$U(I,J)=\sum_{i=1}^{\infty}\sum_{j=1}^{\infty}a_{nm}\cos\frac{2\pi nx_i}{L_x}\cos\frac{2\pi my_j}{L_y}+\sum_{i=1}^{\infty}\sum_{j=1}^{\infty}b_{nm}\cos\frac{2\pi nx}{L_x}\sin\frac{2\pi my}{L_y}+$$
$$+\sum_{i=1}^{\infty}\sum_{j=1}^{\infty}c_{nm}\sin\frac{2\pi nx_i}{L_x}\cos\frac{2\pi my_j}{L_y}+\sum_{i=1}^{\infty}\sum_{j=1}^{\infty}b_{nm}\sin\frac{2\pi nx}{L_x}\sin\frac{2\pi my}{L_y}.$$

При практических вычислениях ряд не может быть бесконечным, поэтому верхним пределом суммирования будет конечное число. После записи уравнений для всех точек измерения получим СЛАУ для определения коэффициентов ряда.

Общим недостатком всех выше перечисленных способов приближения является то, что они никак не соотносят подобранную функцию с источником поля. В.И. Ароновым предложено использовать в качестве приближающих функций поле материальной точки, Цирульский А.В. - поле диполя. Однако и в этом случае переход от аппроксимирующей конструкции к реальным источникам очень затруднен. Е.Г. Булах предложил использовать поля горизонтальных цилиндров и уступов.

Трудности приближения полей одной функцией на участке в целом состоят в том, что значение функции в одной точке определяет поведение функции во всей области приближения. Эти недостатки вынудили обработчиков обратиться к локальному описанию. При таком описании участок делится на подобласти,

на которых поле приближают простой функцией. На разных подобластях поле описывают разными функциями.

Широкое применение в задачах восстановления функций нашли сплайны. Сплайны – это функции, склеенные из кусков некоторого заранее определенного набора функций. Самый распространенный пример сплайна – кусочно-линейный - ломанная. Параболический сплайн имеет на каждом звене описание в виде полинома второй степени $Ax^2 + Bxy + Cy^2 + D$. На 3 узлах строится парабола, далее проводится гладкое продолжение. Недостатки параболического сплайна: осцилляции, не приближает вторую производную, неоднозначность построения.

Наиболее широкое применение в задачах приближения нашли кубические сплайны, тригонометрические сплайны, параметрические сплайны.

Определение. Интерполяционным кубическим сплайном S(x) называют дважды непрерывно-дифференцируемые, которые удовлетворяют в узлах условиям интерполяции и на каждом отрезке совпадает с некоторым полиномом третьего порядка:

$S(x) = A_i x^3 + B_i x^2 + C_i x + D_i$.

Таким образом, кубический сплайн на n отрезках определена 4n параметрами. Для их определения используют 2n условия интерполяции, n-1-склейка первой производной, n-1 – склейка второй производной. Два необходимо добавить: либо $S'(x_0) = 0$, $S'(x_N) = 0$, либо $S''(x_0) = 0$, $S''(x_N) = 0$. Введем обозначение $M_i = S''(x)$, длину расстояния между узлами $h = x_i - x_{i-1}$.

Выражение второй производной примет вид:

$$M(x) = -M_{i-1}\frac{(x_i - x)}{h_i} + M_i\frac{(x_i - x)}{h_i}$$

Первая производная примет вид:

$$P_i'(x) = -M_{i-1}\frac{(x_i - x)^2}{2h_i} + M_i\frac{(x_i - x)^2}{2h_i} + C_i.$$

Отсюда интерполяционный полином примет вид:

$$P_i(x) = -M_{i-1}\frac{(x_i - x)^3}{6h_i} + M_i\frac{(x_i - x)^3}{6h_i} + C_i x + D_i.$$

Представим сумму двух последних слагаемых в виде:

$C_i x + D_i = A_i(x_i - x) + B_i(x - x_{i-1})$, что означает, что $C_i = A_i + B_i$ и $D_i = A_i x_i - B_i x_{i-1}$

Интерполяционный полином примет вид:

$$P_i(x) = -M_{i-1}\frac{(x_i - x)^3}{6h_i} + M_i\frac{(x_i - x)^3}{6h_i} + A_i(x_i - x) + D_i(x - x_{i-1}).$$

Тогда $P_i(x_{i-1}) = M_{i-1}\frac{h^2}{6} + A_i h = y_{i-1}. \Rightarrow A_i = \frac{y_{i-1}}{h} - M_{i-1}\frac{h_i}{6}$.

$$P_i(x_i) = M_i \frac{h^2}{6} + B_i h = y_i, \Rightarrow B_i = \frac{y_i}{h} - M_i \frac{h_i}{6}$$

$$P_i'(x) = -M_{i-1} \frac{(x_i - x)^2}{2h_i} + M_i \frac{(x_i - x)^2}{2h_i} + \frac{y_i - y_{i-1}}{h} - \frac{h}{6}(M_i - M_{i-1})$$

$$P_i'(x_i) = M_i \frac{h_i}{2} + \frac{y_i - y_{i-1}}{h_i} - \frac{h}{6} M_i + \frac{h_i}{6} M_{i-1}, \; P_i'(x_i) = M_i \frac{h_{i-1}}{2} + \frac{y_{i+1} - y_1}{h_{i+1}} - \frac{h_{i+1}}{6}(M_{i+1} M_i).$$

Получили СЛАУ вида

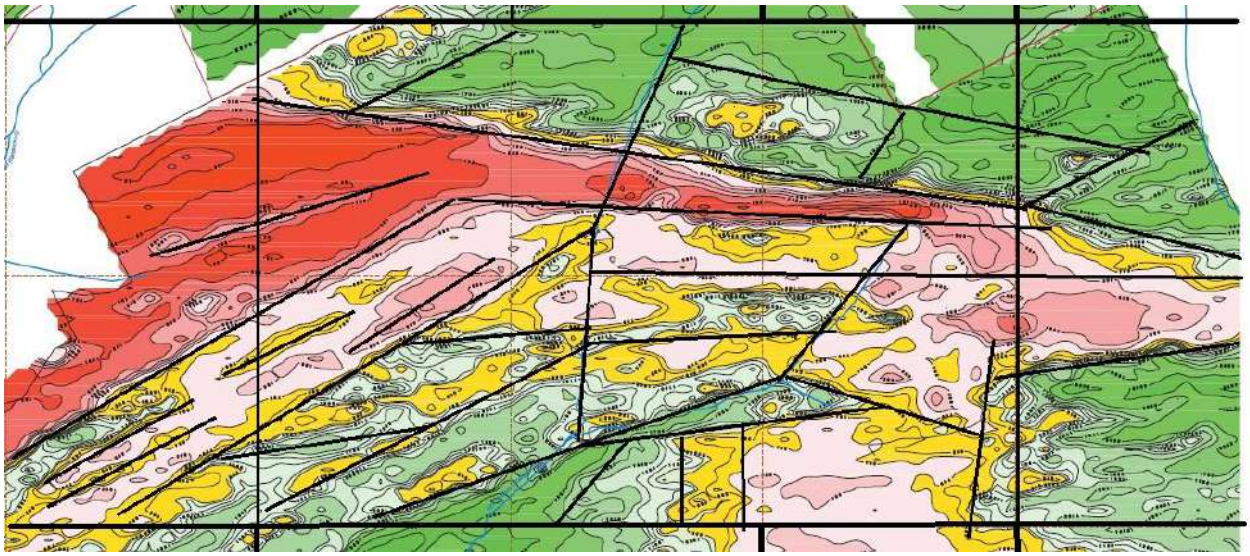
$$\frac{h_i}{6} M_{i-1} \frac{h_i + h_{i+1}}{3} M_i + \frac{h_{i+1}}{6} = -\frac{y_{i+1} - y_1}{h_{i+1}} - \frac{y_i + y_{i-}}{h_i}.$$

Добавляем условия $M_0 = 0$ и $M_n = 0$ получаем трехдиагональную матрицу:

$$\begin{matrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{h_1}{6} & \frac{h_1 + h_2}{3} & \frac{h_2}{6} & 0 \\ 0 & \frac{h_2}{6} & \frac{h_2 + h_3}{3} & \frac{h_3}{6} \\ 0 & 0 & \frac{h_3}{6} & \frac{h_3 + h_4}{3} \end{matrix}.$$

Это матрица с диагональным преобладанием. Решение таких СЛАУ устойчиво.

Полученное аналитическое описание результатов измерений позволяет восстановить значение поля или положение поверхности в любой точке, с высокой точностью и малыми вычислительными затратами проводить обработку данных. Например, операции дифференцирования и интегрирования проводятся по правилам для аналитических функций. Для поверхностей сеть разбиения может быть треугольной, прямоугольной, квадратной.



ЛЕКЦИЯ 5 Построение разрезов

При изучении осадочных разрезов мы замечаем, что появление выше по разрезу некоторых пород зависит от характера предшествующего разреза. Процессы, в которых наблюдают влияние предшествующих событий на последующие, в математике называют цепями Маркова. В цепях Маркова вероятность перехода из одного состояние в другое зависит от предшествующего состояния. В цепях Маркова вероятности перехода считают постоянными. Если наблюдается зависимость только от предшествующего состояния, цепь Маркова называют цепью первого порядка. Возможно построение цепей более высокого порядка.

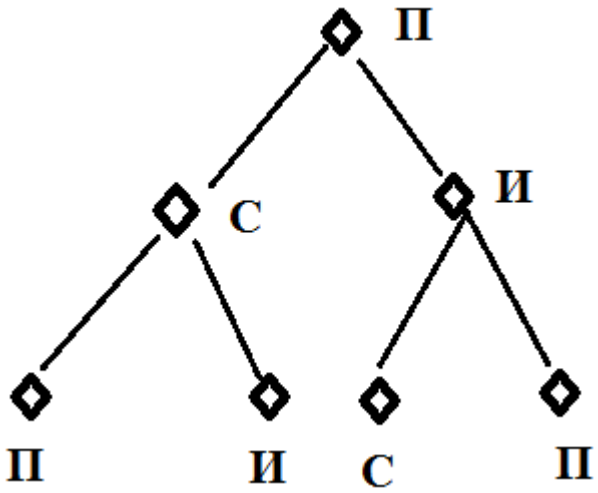
Вероятности перехода принято представлять в виде матриц:

Песчаник	0	0,5	0,5
Сланец	0	0,3	0,7
Известняк	0,5	0,5	0

При подсчете вероятностей берут несколько интервалов фиксированной длины.

В таблице указаны условные вероятности. Точнее в таблице статистические оценки этих вероятностей - частоты. Матрица переходных вероятностей полезный метод анализа и способ описания. Такие описания широко используются для моделирования литологической колонки.

Другой способ описания стратиграфической колонки – построение деревьев.



Вероятность появления литотипа через этап рассчитывается умножением вероятностей (частот) вдоль пути по дереву. Для учета мощности слоев в разрезе вводят скорости перехода.

При моделировании двухмерных разрезов с помощью цепей Маркова можно моделировать соответствующие геофизические поля.

При оценке запасов углеводородов необходимо описывать стратиграфические подразделения. Результаты исследования стратиграфических показывает, что изменчивость свойств горных пород в зависимости от глубины недостаточно точно для практических задач описывается случайными процессами. Необходимо эту изменчивость аппроксимировать суммой случайной и детерминированной составляющих. Характер этой изменчивости влечет такую же изменчивость геофизических параметров: физических свойств и полей.

Отображение структуры разреза вскрытого одной скважиной на разрез другой скважины сложнейшая задача. При этом, может вдоль скважины вскрыт весь разрез или часть разреза. Изначально эту задачу решали на основе корреляционного анализа кривых ГИС, в частности путем вычисления функций взаимной корреляции. Существенное влияние на решение задачи оказывает шаг измерений. Задача значительно усложняется тем, что отражение вещественного состава на свойства косвенное. Малое изменение вещественного состава часто вызывает значительное изменение свойств и наоборот. Сложное отражение в полях имеет мощность слоев и размер исследуемой площади..

Вайнберг предложил применять для анализа флиша марковские цепи. Другие специалисты применяют прослеживание реперов в разрезах скважин Определящую роль будет играть выбор опорного разреза (реперов). Для геофизических методов необходимо оценить информативность геофизических признаков. Волков А.М. рассмотрел информативность 14 методов исследования скважин. Он показал, что 2 признака практически полностью исчерпывают возможности каротажа.

Цепи Маркова.

ЛЕКЦИЯ 9 НЕФТЕГАЗОНОСНОСТЬ

При вычислении прогнозных ресурсов оценивают перспективы крупного региона. При вычислении оценки учитывают сходство с районами с установленной нефтегазоносностью, площадь территории, вещественный состав осадков, их вертикальную мощность, дислоцированность осадков. Одна из предлагаемых оценок:

$$\lg Q = 1.613 \lg W + 2.813,$$

где Q – общие ресурсы, W – средняя объемная скорость осадконакопления (тыс. км^3/млн. лет).

Для подсчета запасов нефти в первом приближении необходимо вычислить:

$$Q = \iiint_V \alpha(x,y,z) m(x,y,z) \sigma(x,y,z) \eta(x,y,z) dV ,$$

где переменные в порядке следования: коэффициент нефтенасыщенности, коэффициент открытой пористости, плотность нефти, коэффициент нефтеотдачи. Известно, что плотность нефти увеличивается при приближении к границе залежи, в том же направлении плотность газа уменьшается.

Для оценки прогнозных ресурсов используют уравнения регрессии:

$$\ln Q = \ln S + 0.1\ln D + 0.61\ln M - 0.5\ln\tau + 2\ln T - 0.5\ln C + 2\ln\vartheta + 2\ln\theta,$$

где переменные в порядке следования в уравнении: прогнозные ресурсы, площадь нефтесбора, мощность резервуара, доля сапропелевой составляющей, температура пород, время погружения резервуара на глубину более 300 м, содержание органического вещества, коэффициент структурного экранирования, коэффициент литологического экранирования.

Другое уравнение:

$$\ln Q = \alpha_1 \ln KC + \alpha_2 \ln B + \alpha_3 \ln \Pi + \alpha_4 \ln S + \alpha_5 \ln \Gamma + \alpha_6 y + \alpha_7 \ln r + \alpha_8 \ln\frac{A+a}{A},$$

переменные в порядке следования в уравнении:КС катагенное преобразование РОВ, В - отношение растворенных в воде органических кислот к содержанию гидрокарбонат-иона, $\Pi = \frac{h-l}{h}$, где h – общая мощность пласта в пределах ловушки, l – суммарная мощность глинистых прослоев в пласте, S – сорбционные свойства пласта, Г – нефтесборная площадь, у – мощность гидродинамически связанной толщи, r – частота возникновения условий для выделения углеводородов, А – амплитуда наиболее резкого регионального поднятия, а – амплитуда ловушки.

Набор признаков в уравнении регрессии для каждого района специфичен. Коэффициенты при признаках в уравнении регрессии для разных регионов разные.

Результат прогноза зависит от исполнителя работ и стадии геологоразведочной стадии.

При решении задач прогноза необходимо учитывать дисперсию признаков.

Основной результат геологоразведочных работ – промышленные запасы. Объем резервуара насыщенного нефтью вычисляют как произведение площади залежи на среднюю эффективную нефтенасыщенную мощность. Если результат умножить на пористость получим объем порового пространства. Если его умножить на коэффициент нефтенасыщенности получим объем нефти. Умножая плотности нефти на объем получим вес. Эту величину необходимо умножить на коэффициенты нефтеотдачи и коэффициент усадки – получим балансовые запасы. Для получения промышленных запасов необходимо балансовые запасы умножить на коэффициент извлечения.

Последовательность оценки запасов:

1. Определяют проницаемые интервалы в пласте. Строят карту эффективной мощности

2. Строят структурные карты кровли и подошвы пласта.
3. Определяют положение водно-нефтяного контакта.
4. Строят карту эффективной нефтенасыщенной мощности.
5. Находят объем нефтенасыщенных пород
6. Определение извлекаемых запасов.

В формуле подсчета запасов:

$$Q = Shm\eta\chi K_{но} K_{ус} .$$

используются средние постоянные значения параметров. Нередко изменчивость свойств не позволяет использовать это выражение для подсчета запасов, поскольку ошибки могут достигать десятков процентов.

ЛЕКЦИЯ 10 ПОДСЧЕТ ЗАПАСОВ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Рудное тело понятие не геологическое, а экономическое. Граница тела проводится, ограничивая объем, добыча в котором приносит прибыль или условно реентабельна (экономически выгодна для месторождения в целом или группы месторождений в целом). С развитием технологий добычи отвалы старых месторождений переходят в категорию месторождений. Полное представление о месторождении мы получаем по окончании разработки.

Обычно рудные тела разбивают на отдельные блоки – тела достаточно простой геометрической формы с некоторым постоянным содержанием полезного компонента – железа, окиси хрома и т. д. На рис. показано содержание серебра вдоль штольни на одном из месторождений. Видно, что содержание серебра меняется нелинейно, быстрее, чем линейная зависимость, дисперсия содержаний с увеличением содержаний увеличивается. При подсчете запасов такие зависимости сглаживают в скользящем окне. Формула расчета:

$$C(0) = \sum_{1}^{T} w_i C_i .$$

Выбор весов проводится на основе практического опыта, например, обратно пропорционально расстоянию от оцениваемой точки или линейной зависимостью.

Крайгинг – один из методов скользящего среднего. В нем обоснованно выбирают размер окна и весовые коэффициенты для узлов. Метод оценки пространственно распределенных величин и погрешности этой оценки. Успешно применялся для подсчета запасов серебра. Назовем переменную величину регионализированной, если она непрерывно меняется, но неизвестно ее аналитическое описание.

Пусть в нерегулярной сети измерений получены значения параметра. Значение в некоторой точке связано со значениями в соседних точках. Степень влияния зависит от направления и расстояния. Степень зависимости в каком либо направлении (по профилю) можно определить ковариацией $K(\Delta j)$. Для той же точки можно определить полудисперсию:

$$\chi = \frac{1}{2}\sum_{1}^{N}(y_{i+1} - y_i)^2 \cdot$$

Полудисперсия и ковариация связаны соотношением $\chi(\Delta j) = K(0) - K(\Delta j)$. С уменьшение расстояния до бесконечно малого определяются практически одними и теми же точками, т.е. при малых расстояниях они почти одинаковы, пс увеличением расстояния полудисперсия асимптотически стремиться к предельному значению – К(0). Расстояние на котором эта величина достигается (почти) называют рангом. Ранг – расстояние на котором значения параметра можно считать независимыми. Если между точками расстояние больше ранга, в центре интервала находятся точки, значения параметра в которых никак не связано со значениями на концах. Оценку запасов проводить нельзя.

График полудисперсии методом наименьших квадратов аппроксимируют функциями

$\chi(h) = 3\alpha ljg|h|$, $\chi(h) = \alpha|h|$.

Выбор правильной модели этой зависимости самый главный этап обработки. График этой зависимости называют вариограммой. Вариограммы расчитывают как минимум по трем направлениям, чтобы убедиться в том, что распределение переменной изотропное. На практике чаще всего данные считают изотропными и стационарными.

Для точечного крайгинга необходимо построить уравнение скользящего среднего, а следовательно необходимо определить весовые коэффициенты в этом уравнении. Составляют СЛАУ для определения весовых коэффициентов.

Крайгинг позволяет получить более надежные оценки содержаний, чем полиномиальный тренд-анализ. Кроме того крайгинг позволяет дать оценкц вероятной ошибки

При вычислении прогнозных ресурсов углеводородов оценивают перспективы крупного региона. При вычислении оценки учитывают сходство с районами с установленной нефтегазоносностью, площадь территории, вещественный состав осадков, их вертикальную мощность, дислоцированность осадков. Одна из предлагаемых оценок:

$\lg Q = 1.613\lg W + 2.813,$

где Q – общие ресурсы, W – средняя объемная скорость осадконакопления (тыс. км^3/млн. лет).

Для подсчета запасов нефти в первом приближении необходимо вычислить:

$$Q = \iiint_V \alpha(x,y,z) m(x,y,z) \sigma(x,y,z) \eta(x,y,z) dV ,$$

где переменные в порядке следования: коэффициент нефтенасыщенности, коэффициент открытой пористости, плотность нефти, коэффициент нефтеотдачи. Известно, что плотность нефти увеличивается при приближении к границе залежи, в том же направлении плотность газа уменьшается.

Для оценки прогнозных ресурсов используют уравнения регрессии:

$$\ln Q = \ln S + 0.1 \ln D + 0.61 \ln M - 0.5 \ln \tau + 2 \ln T - 0.5 \ln C + 2 \ln \vartheta + 2 \ln \theta ,$$

где переменные в порядке следования в уравнении: прогнозные ресурсы, площадь нефтесбора, мощность резервуара, доля сапропелевой составляющей, температура пород, время погружения резервуара на глубину более 300 м, содержание органического вещества, коэффициент структурного экранирования, коэффициент литологического экранирования.

Другое уравнение:

$$\ln Q = \alpha_1 \ln KC + \alpha_2 \ln B + \alpha_3 \ln \Pi + \alpha_4 \ln S + \alpha_5 \ln \Gamma + \alpha_6 y + \alpha_7 \ln r + \alpha_8 \ln \frac{A+a}{A} ,$$

переменные в порядке следования в уравнении: КС катагенное преобразование РОВ, В - отношение растворенных в воде органических кислот к содержанию гидрокарбонат-иона, $\Pi = \frac{h-l}{h}$, где h – общая мощность пласта в пределах ловушки, l – суммарная мощность глинистых прослоев в пласте, S – сорбционные свойства пласта, Г – нефтесборная площадь, у – мощность гидродинамически связанной толщи, r – частота возникновения условий для выделения углеводородов, А – амплитуда наиболее резкого регионального поднятия, а – амплитуда ловушки.

Набор признаков в уравнении регрессии для каждого района специфичен. Коэффициенты при признаках в уравнении регрессии для разных регионов разные.

Результат прогноза зависит от исполнителя работ и стадии геологоразведочной стадии.

При решении задач прогноза необходимо учитывать дисперсию признаков.

Основной результат геологоразведочных работ – промышленные запасы. Объем резервуара насыщенного нефтью вычисляют как произведение площади залежи на среднюю эффективную нефтенасыщенную мощность. Если результат умножить на пористость получим объем порового пространства. Если его умножить на коэффициент нефтенасыщенности получим объем нефти. Умножая плотности нефти на объем получим вес. Эту величину необходимо умножить на коэффициенты нефтеотдачи и коэффициент усадки – получим балансовые запасы. Для получения промышленных запасов необходимо балансовые запасы умножить на коэффициент извлечения.

Последовательность оценки запасов:

1. Определяют проницаемые интервалы в пласте. Строят карту эффективной мощности
2. Строят структурные карты кровли и подошвы пласта.
3. Определяют положение водно-нефтяного контакта.
4. Строят карту эффективной нефтенасыщенной мощности.
5. Находят объем нефтенасыщенных пород
6. Определение извлекаемых запасов.

В формуле подсчета запасов:

$$Q = Shm\eta\chi K_{но} K_{ус} .$$

используются средние постоянные значения параметров. Нередко изменчивость свойств не позволяет использовать это выражение для подсчета запасов, поскольку ошибки могут достигать десятков процентов.

Подсчет запасов золота

Подсчет запасов угля.

ЛЕКЦИЯ 13 ПРИНЦИПЫ ИЗУЧЕНИЯ НЕДР И ЭТАПЫ АНАЛИЗА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Практикой выработаны принципы изучения недр:

1 **Принцип последовательных приближений.** Изучение геологического строения осуществляется последовательно в разных масштабах от мелкого к крупному, т. е. от общего к частному. Этот принцип обеспечивает оптимальность финансовых затрат, временных затрат и информационной содержательности получаемых результатов. Принцип последовательных приближений означает, что изучение проводится в последовательности: провинции, зоны, районы, структуры, участки. Министерством природных ресурсов Российской Федерации установлены стадии геологоразведочных работ:

1 стадия. Региональное геологическое изучение недр и прогнозирование полезных ископаемых (масштаб работ 1:500000 и мельче).

2 стадия. Поисковые работы. Цель работ - выявление проявлений полезных ископаемых.

3 стадия. Оценочные работы. Цель работ – отбраковка проявлений полезных ископаемых, не представляющих промышленной ценности.

4. Разведка месторождения. Цель работ – изучение месторождения для составления ТЭО освоения месторождения.

5. Эксплуатационная разведка.

2 **Принцип аналогии** – один из самых главных и давно применяемых принципов. Он предполагает сравнение с эталонами, например со

стратотипами. Для оценки перспектив площади проводят сравнение с хорошо изученными территориями со сходным геологическим строением.

3 **Принцип выборочной детализации** – проведение работ на выделенных участках с большей детальностью. На таких участках в больших объемах проводится бурение, изучение образцов лабораторными методами.

4 **Принцип равной достоверности.** На всей площади степень изученности должна быть одинаковой.

5 **Принцип полноты исследования.** Территорию необходимо всесторонне изучать всеми доступными методами. Например, изучить изменчивость физических свойств, ее связь с изменчивостью вещественного состава пород.

6 **Принцип разумных затрат –** оптимизация времени и финансовых затрат.

В разных методах изучения недр эти принципы приобретают свои особенности. Например, В.Н. Страхов сформулировал принципы при изучении недр потенциальными геофизическими методами, которые, в основном, справедливы и для других геофизических методов поисков и разведки месторождений полезных ископаемых.

Предварительная схема анализа геофизических полей указана в проекте работ. Несмотря на то, что геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых все более приближаются к стандартным технологиям, выполняемым в соответствии с установленным стандартом и инструкциями, они в значительной степени имеют исследовательский характер. Поэтому после проведения съемки уточняют последовательность анализа физических полей и перечень процедур и алгоритмов обработки и истолкования.

Анализ геофизических полей проводится в следующей последовательности:

1. Изучение работ предшественников. Анализ региональной геологической обстановки и всех имеющихся региональных геофизических полей. Постановка задач геологического истолкования геофизических полей. Определение сотрудников, своих и привлеченных из других организаций, способов и средств (программных пакетов), необходимых для истолкования геофизических материалов. Решение прямых задач и имитационное моделирование.

2. Обработка и анализ результатов измерений физических свойств горных пород. Определение законов распределения и величин эффективных параметров. Выявление корреляционных связей и зависимостей между свойствами. Построение уравнений регрессии вида:

$$\chi = A\sigma + B, \rho = C\chi + D.$$

3. Выделение структурно-вещественных комплексов (СВК) – выделение групп горных пород, которые можно определить по выбранному комплексу геофизических методов.

4. Качественная интерпретация. Предварительное определение геометрических и физических параметров СВК, с небольшим объемом вычислений, без решения объемных обратных задач. Составление схем геофизических полей

5. Количественная интерпретация для каждого метода – решение обратных задач для каждого физического поля с применением методов регуляризации. Создание однометодных физико-геологических объемных моделей. Увязка результатов истолкования данных полевых и скважинных измерений.

6. Комплексная интерпретация – согласование решений обратных задач. Выявление корреляционных связей между разными полями, между полями и геологическими границами. Результативные материалы содержат все объекты, выделенные по разным полям.

7. Геологическое истолкование – наделение геологическим содержанием выделенных объектов, результаты геофизических работ формулируются в геологических терминах: гранит, дайка, песчаник, пласт, падение, простирание и т. д. Составление геолого-геофизических разрезов и трехмерных моделей.

8. Разработка рекомендаций для дальнейших исследований. Выделение перспективных участков для изучения в крупном масштабе, перечень рекомендуемых методов изучения, прогнозные ресурсы.

Существует несколько **методообразующих идей** на основе которых разрабатывают методы истолкования:

Идея аналитической аппроксимации – приближенное описание реальных объектов. При обработке интегрирование заменяют суммированием, производные конечно-разностными схемами, широко применяются итерационные вычислительные схемы. Геологическая среда сложная, поэтому ее описывают простыми математическими конструкциями. Метод подбора – аналитическая аппроксимация.

Идея алгебраизации – описание задачи численными параметрами, сведение поставленных задач к решению алгебраических задач. Описание геологических поверхностей уравнениями. Определение параметров свести к решению уравнений.

Идея критериальности – решение задач и достижение цели должно оцениваться критериями, сформулированными на этапе планирования геологоразведочных работ. ДОЛЖЕН БЫТЬ ЗАДАН КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ ВЫПОЛНЕННЫХ РАБОТ.

Длительное время основным критерием был критерий наименьших квадратов. В последнее время рассматриваются другие критерии принятия решений:

1. В условиях неопределенности

   а) критерий равнозначных состояний Лапласа основан на построенной функции потерь

   б) максмина Вальда – поиск минимальных наибольших потерь (природа ведет себя как враг)

   в) минимакса сожалений –потери в результате упущенных возможностей на основе построения функции сожаления

   г) критерий пессимизма-оптимизма Гурвица

   выбор либо все плохо либо все отлично
2. В условиях риска

   а) критерий максимума ожидаемой полезности

   б) Критерий Ходжи – Лемана строится функция полезности

   в)критерий наиболее вероятного состояния

   г) критерий минимума ожидаемых сожалений

Идея согласования множества решений – усереднение характеристик по множеству решений, не противоречащих известным данным. Комплексное геологическое истолкование данных нескольких методов Один из подходов – обезразмеривание полей разной природы, их нормирование и переход к анализу произведений и сумм относительных величин. Другой подход – вычисление производных и интегралов (псевдополей).

Идея распознавания образов – процедуры принятия решений, суть которых наделение полученного набора параметров геологическим содержанием.

Задачу распознавания образов по геофизическим данным можно сформулировать следующим образом:

1. С помощью имитационного моделирования создать физико-геологические модели возможных типов месторождений.
2. Разбить изучаемую площадь на участки, отличающиеся по геофизическим данным.
3. Выделение признаков, которые свидетельствуют о возможном рудном процессе
4. Отнесение участков к группе заслуживающих дальнейшего изучения и бесперспективных.
5. Геологическое истолкование с помощью процедур искусственного интеллекта, Окончательное решение принимается естественным интеллектом, основанным на квалификации, интеллекте, эрудиции и интуиции интерпретатора (информация мать интуиции).

Существует два подхода: с использованием эталона искомых объектов – образа геологического объекта в многомерном пространстве. Для создания надежного эталона необходимо иметь сведения о десятках месторождений, что крайне редко возможно. Безэталонная классификация – задача естественного расслоения многомерных данных. Выделенные классы могут не иметь геологического содержания.

Идея гарантированного подхода.

Опыт истолкования геолого-геофизических данных позволил выделить принципы анализа: выделение областей заведомо не содержащих источники и областей гарантировано содержащих искомые источники (геологические тела).

ЛЕКЦИЯ 11 ПРИНЦИПЫ АНАЛИЗА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

1.**Целенаправленности** – любые геологоразведочные работы проводятся для достижения цели поставленной в проекте работ, например, поиска мелких по запасам месторождений угля до глубины 500 м. Сеть измерений, алгоритмы обработки, граф истолкования геолого-геофизических данных – должны обеспечить достижение цели.

Цель работ определена геологическим заданием, она указана на обложке проекта работ: Проект на проведение геофизических работ масштаба 1:10000 в Коркинском районе Челябинской области в 2018 г. с целью поисков месторождений угля. Анализ геофизических данных направлен на достижение поставленной цели.

Для достижения цели необходимо поставить задачи каждому геофизическому методу комплекса геологоразведочных работ, решение которых приведет к успеху. Например, провести электроразведку, ВСП, РВП с целью выделения зон метасоматоза.

2. **Системности** – анализ проводится с учетом всех связей, всех геолого-геофизических данных, а не только того поля, которое изучают. Принцип системности основан на двух базовых положениях:

1 Всеобщей связи – система представляет собой набор элементов взаимодействующих друг с другом. Особенно ярко это проявляется на месторождениях высокомагнитных руд.

2 Иерархии – упорядоченности объектов, находящихся на территории, в некоторой последовательности, например, по перспективности для дальнейшего изучения и масштабу проводимых работ.

Построение системной модели геологической среды проводят по:

- противоречивым данным, поскольку геофизические поля обусловлены различными физическими свойствами,

- отрывочным данным, на различных участках в нашем распоряжении не все поля, на некоторых участках съемку провести невозможно (болото, обрыв, техногенные помехи),

- при отсутствии некоторых данных, (не было проведено измерение остаточной намагниченности)

- несогласованным данным, измерения чаще всего по разным сетям пунктов,

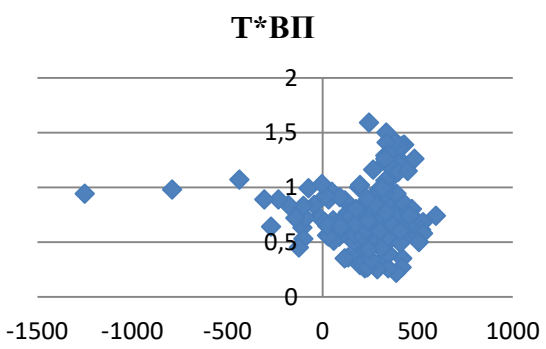
- неопределенности, свойства горных пород на площади меняются в некотором диапазоне,

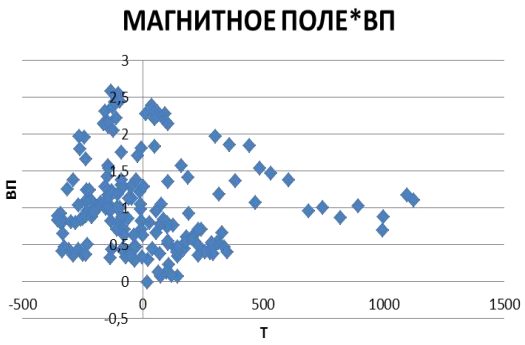
- при невозможности формализации некоторых данных (окраска породы, цвет черты, текстура, структура породы, открытая пористость, закрытая пористость, и т. д.).

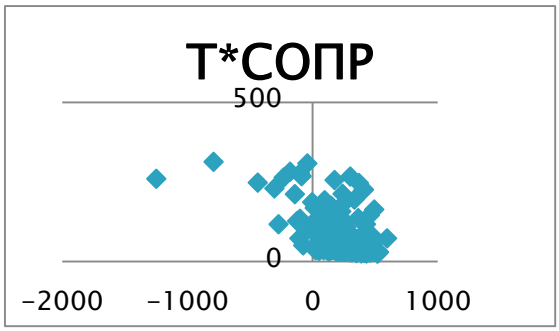
- геологическая среда представляет собой набор многокомпонентных сложно построенных объектов, связанных множеством взаимосвязей, причем некоторые взаимосвязи не всегда можно описать количественными соотношениями.

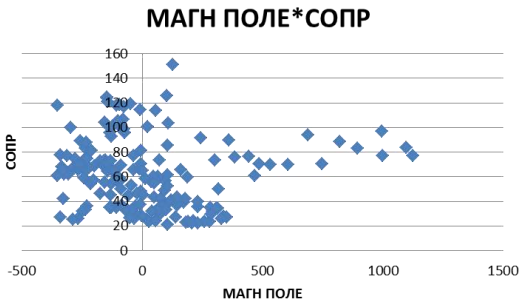
Выявление этих связей часть процесса истолкования. Геологическая среда не механический набор элементов, а единый объект, состоящий из взаимодействующих элементов, что приводит к новому качеству. Это свойство наиболее ярко проявляется в геофизических полях. Изменение одного элемента модели влечет изменение всей модели. При поисках золота при приближении к рудной зоне, часто устанавливают резкое увеличение дисперсии полей, противоположное изменение кажущегося сопротивления, поляризуемости, магнитного поля (рис. 11.1).

Использования корреляционных связей – при проведении комплексной интерпретации необходимо учитывать связи между физическими параметрами, которые отражают вещественный состав геологических объектов. На основе выявленной корреляционной связи плотности и скорости упругих волн в горных породах по данным сейсморазведки создают объемную плотностную модель, для которой решают обратную задачу гравиразведки.









РУДНЫЙ БЕЗРУДНЫЙ

Рис.11.1 Поле корреляции рудных и безрудных участков

Многостадийности – одну и ту же территорию изучают в соответствии со стадиями геологоразведочных работ. Работы проводят в последовательности соответствующей стадиям геологического изучения и масштабам: региональной - 1:100000, 1:50000, поисковой - 1:10000 и так далее. Сначала изучают региональное поле, потом локальное. Изучение площади завершают детальными работами и измерениями на интерпретационных профилях с меньшим шагом наблюдений и повышенной точностью на перспективных участках. Геологические работы на одной площади направлены на решение разных геологических задач: геологическое картирование, поиски и т.д. Сначала изучают структуры, затем СВК, затем поиск МПИ, затем изучение отдельных рудных тел и залежей.

3. **Определяющей роли интерпретационного процесса** – весь процесс изучения построен под имеющиеся технологии истолкования. Прежде чем проводить полевые работы необходимо определить, какие процедуры обработки и в какой последовательности будут применены к результатам измерений и полученным данным. Процесс истолкования полезно изображать в виде сетевого графика (графа) или диаграммы Грамма. Процесс анализа результатов и перечень процедур обработки предусматривается проектом, их корректируют в ходе выполнения работ.

Предварительная схема анализа геофизических полей указана в проекте работ. На основе схемы составляется смета, т. е. выделяют деньги, в том числе на заработную плату. Несмотря на то, что геологоразведочные работы все более приближаются к стандартным технологиям, выполняемым в соответствии с установленным стандартом, они в значительной степени имеют исследовательский характер. Поэтому после проведения съемки определяют последовательность анализа физических полей и корректируют граф обработки (принципы 7 и 8).

4.**Формализации** – поставленные задачи необходимо перевести на язык математики. Это идеализация, следует помнить, что геологическая задача не

тождественна математической задаче. Геологические границы аппроксимируют и описывают линейными функциями, что конечно является приближением и идеализацией реальной геологической обстановки.

Геологические термины и понятия нельзя выразить в строгой математической форме, как впрочем биологические, исторические и другие. В ином случае осталась бы одна наука – математика. Название горной породы изначально допускает широкий диапазон изменения минерального состава, что находит отражение в физических свойствах и полях и приводит к необходимости описания среды усредненными характеристиками. Возможно и обратное – существенное изменение физических свойств с геологической точки зрения ничего не меняет. Например, небольшое изменение содержания магнетита в горной породе существенно меняет интенсивность магнитного поля.

В методе подбора стремятся к близости измеренного поля и теоретического. До появления ЭВМ степень близости (качество подбора) оценивалась интерпретатором. При компьютерной обработке необходимы математические оценки. Формальное выражение идеи подбора:

$$\sum_{i=1}^{N}\left(g_{i_i}^{ИЗМЕР} - g_i^{TEOP}\right)^2 \to MIN$$

Выбор критерия минимизации не отражает геологическое содержание задачи. Его заимствуют из другой отрасли знаний – математики. Критериев близости функций, используемых в разведочной геофизике много: МНК, минимакса и другие.

Линеаризации – сведение нелинейных уравнений при небольшом изменении аргументов или параметров задачи к линейным уравнениям, использование самых простых линейных зависимостей, методика работы с которыми хорошо разработана:

для плотности $\sigma = Av + B$,

положение плотностной границы $H = C\Delta g + D$.

Часто используют разложение аналитических функций в ряд и выделение линейной части ряда:

ряд Тейлора $f(x+\Delta x) = f(x) + f'(x)\Delta x + ...$

Это разложение применяется при выводе формулы электрического потенциала диполя:

бином Ньютона $(1+x)^n = 1 + nx + ...$

Разложение применяется при выводе формулы расчета влияния небесных тел на величину силы тяжести и при выводе формулы влияния наклона оси чувствительности гравиметра. Пример: взаимосвязь плотности и магнитной

восприимчивости, глубины геологической границы свит с разной плотностью и интенсивности физического поля.

Регуляризации - применение методов преодоления некорректности (отсутствие решения в выбранном модельном классе, множественности решений, неустойчивости) обратных задач. Формальная запись регуляризующего алгоритма:

$$\sum_{i=1}(f_{ИЗМ} - f_{ТЕОР})^2 + \sum(P_{i0} - P_{iПОДБОРА})^2 \Rightarrow MIN\,,$$

В этом выражении второе слагаемое обеспечивает не слишком большое отклонение от начальной модели геологического строения.

Параметризации – сведение поставленной геологической задачи к отысканию относительно небольшого числа параметров (десятки в 60-е годы XX века, 30000 – 40000 в современное время). Чем меньше параметров, тем устойчивее решение, т.е. уменьшение влияния изменения начального приближения на решение. Чем меньше параметров, тем грубее аппроксимация среды. **Уменьшение числа определяемых параметров основной путь снижения степени некорректности обратной задачи**.

Шар и круговой горизонтальный цилиндр определяются 3 параметрами, прямоугольный параллелепипед – 7 параметрами, усеченная 4-хугольная пирамида – 9.

Редукции математической задачи к СЛАУ – методы решения СЛАУ разных типов хорошо разработаны, чего нельзя сказать о системах нелинейных. Описание поля с помощью кубических сплайнов сводят к решению СЛАУ размерности $4N$, где N – число звеньев. Также подбирают региональный фон в виде линейной функции – по характерным не искаженным локальными аномалиями значениям поля. Задача аналитической аппроксимации сводится к решению СЛАУ. К решению СЛАУ сводят решение интегральных уравнений.

Упрощение задачи путем использования эквивалентных источников для решения частных задач – аналитическая аппроксимация. Под аналитической аппроксимацией подразумевают замену значений поля набором сингулярных источников, т. е. источниками, не имеющими объема (стержни, полосы, точки и т.п.). Определение мощности источников приводит к решению СЛАУ. Окончательное решение формулируют в геологических терминах. Сингулярные источники применяют для формального описания поля, в тех случаях, когда не ставят задачу определения геологического строения.

5. **Модельности** – на основе априорной информации формируют геологическую модель, геометрическую модель среды, модель поля, модель связи физических параметров:

$$\chi = A\sigma + B, \quad \rho = C\chi + D,$$

модель интерпретации. В геологии, моделирование – процесс уточнение усовершенствования ранее существующей модели на основе полученных новых данных (рис. 11.2). Модель отражает только существенные свойства прототипа. Лучшая модель кота – это кот, желательно тот же самый. Модель всегда отражает часть свойств объекта, другая часть свойств не рассматривается. Особенность геологоразведки в том, чтоцель и результат работ – создание модели.

Широкое использование **имитационного моделирования** – необходимо провести решение прямых задачи для большого числа геологических ситуаций, как рудных, так и безрудных, для разных масштабов оруденения и уровня эрозионного среза. Имитационное моделирование позволяет рассмотреть большое количество возможных ситуаций, в том числе таких которые ранее на рассматриваемом объекте не зафиксированы. Имитационное моделирование позволяет оценить несколько конкурирующих гипотез о геологическом строении территории.

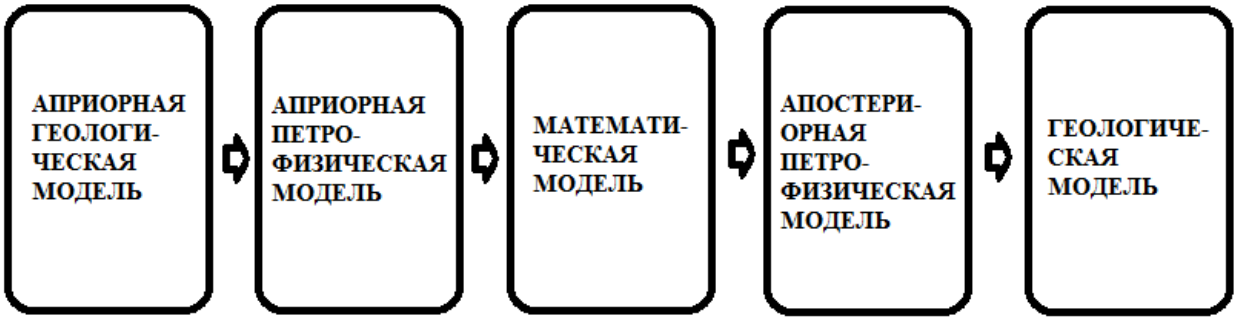


Рис.11.2 Схема создания геолого-геофизической модели

6. **Принцип обратной связи** – в процессе анализа по мере накопления новых знаний в результате проведенных работ или обнаружения новых данных необходимо корректировать исходные модельные представления или менять цель работ и задачи отдельных методов ГРР. На рис. 11.3 представлена модель месторождения, в которой направление падения рудного тела после проведения гравиразведки изменено на противоположное. Падение рудного тела не совпадает с падением границ вмещающих комплексов.

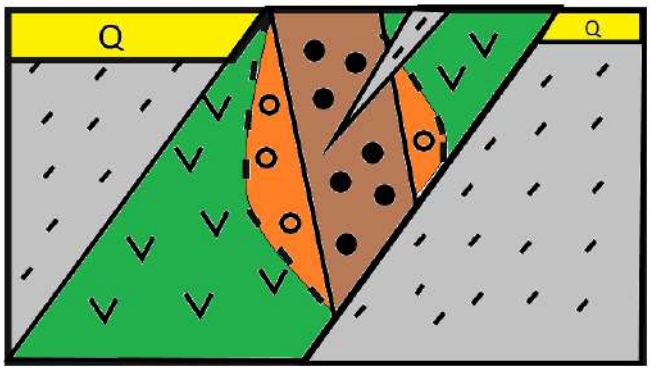


Рис. 11.3 Модель месторождения

7. **Адекватности** используемого инструментария – методы истолкования не должны противоречить реальной ситуации. Например, при изучении горных районов нельзя использовать идеализацию плоской поверхности наблюдений. Всегда необходимо учитывать конечность области, на которой измерено поле (при использовании интегральных методов учитывают только конечную область), поскольку наши континуальные теории решения обратных задач предполагают измерения на бесконечной площади. Измерения проводятся неточно с некоторой погрешностью. Поэтому проводить подбор поля проводят с погрешностью не меньшей чем утроенная погрешность съемки. При значительных размерах территории (L>200 км) необходимо учитывать сферичность нашей планеты. В континуальных теории принято, что поле известно в каждой точке. При полевых работах измерения проводятся в узлах дискретной сети пунктов.

8. **Простоты и общности используемых средств** – не следует использовать сложные процедуры там, где можно обойтись простыми средствами, особенно если это не приводит к приросту получаемой информации. Для описания связей физических параметров используют полиномы 1 или 2 степени, редко 3 степени. Для описания геологических поверхностей применяют полиномы невысоких степеней. Чаще всего в геофизике применяют для аппроксимации линейные функции, тригонометрические функции, логарифмические функции.

9. **Использование искусственного интеллекта.** Применение алгоритмов имитирующих разумные действия человека, направленные на распознавание образов. Искусственный интеллект это программы реализующие алгоритмы самообучения. Такие программы должны реагировать на изменение ситуации, отчасти моделирующие эволюцию. Например, алгоритм отжига (отсечение лишнего), алгоритм нейронных сетей, алгоритм муравья (задача комивояжера), генетические алгоритмы, алгоритмы нечеткой логики, алгоритм систем с правилами, марковские цепи, умные агенты. Признак интеллекта логические операции, процедуры выбора из нескольких возможных вариантов, описывающие правила принятия решения. Особенно популярны алгоритмы интерпретации нейронных сетей при геофизических исследованиях скважин.

В ближайшем будущем технологии искусственного интеллекта будут доминировать во всех геофизических методах и на полевых работах, и при проведении геологического истолкования, и особенно при истолковании комплексных данных.

10. **Изучения помех** – без правильной оценки погрешности в измеренных данных истолкование проводить нельзя. Например, требование к сечению изолиний исключают появление аномалий, обусловленных инструментальной

погрешностью и методикой измерений. Необходимо оценивать географические и геологические помехи. Геологические помехи создают объекты, поле которых при выбранной сети измерений значимо не более чем в двух пунктах измерений. Существуют помехи связанные с поверхностью наблюдения и сферической формой нашей планеты, их величина может существенно исказить поле объекта.

В настоящее время распределение помех описывают нормальным законом распределения. Практика указывает на то, что распределение помех на площади неравномерное по величине и в пространстве.

11. **Исключения известного** – эффекты, обусловленные известными объектами, необходимо исключить из рассмотрения. Такая процедура носит название геологическое редуцирование. Из измеренного поля вычитают поле известных объектов, полученные в результате решения прямых задач, что подчеркивает значимость большого набора процедур решения прямых задач в интерпретационных пакетах. Это неизбежно уменьшит область неоднозначности и неустойчивость решения обратной задачи. Этот процесс самый эффективный способ уменьшения степени некорректности обратной задачи. Исключение регионального фона с помощью геологического редуцирования – самый точный способ его учета.

12. **Геологической содержательности** – результат работ должен соответствовать поставленной геологической цели. Результат истолкования необходимо представлять в геологических терминах (рис. 11.3). Например, выделение участков для дальнейшего детального изучения, признание территории бесперспективной, аномалия обусловлена дайкой порфиритов, аномалия обусловлена железными рудами (магнетитовыми).

13. **Оптимизации** – разработка критериев оценки эффективности проведенного анализа. Оптимум это согласование противоречивых требований. Рациональный комплекс геофизических методов должен отвечать требованиям:

- наименьшие затраты,
- получение полной информации об объекте поисков,
- наименьшее время выполнения работ.

Можно построить целевую функцию, минимум или максимум которой необходимо найти:

$$F = \alpha I + \beta Z + \gamma T .$$

Часто математические критерии не отражают геологическую суть задачи. Например, при использовании гарантированного подхода не ищут минимум целевой функции.

Следует помнить, что оптимизация приводит к абсурду, если не учитывать содержание задачи.

14. **Адаптации** – любая методика!!! анализа в конкретных условиях видоизменяется, приспосабливается к геологической ситуации, сети измерений, рельефа, мощности рыхлых отложений. Например, для КМА используют пластовые элементарные тела, для кимберлитовых тел вертикальные эллиптические цилиндры, усеченные конусы и др.

Анализ геофизических полей проводится в следующей последовательности:

1. Изучение работ предшественников. Анализ региональной геологической обстановки и региональных геофизических полей. Постановка задач геологического истолкования геофизических полей. Определение сотрудников, своих и привлеченных из других организаций, способов и средств (программных пакетов), необходимых для истолкования геофизических материалов. Решение прямых задач и имитационное моделирование.

2. Обработка и анализ результатов измерений физических свойств. Определение законов распределения и величин эффективных параметров. Выявление корреляционных связей и зависимостей между свойствами.

$$\chi = A\sigma + B\,,\ \rho = C\chi + D\,.$$

Построение уравнений регрессии вида:

$$\chi = A\sigma + B\,,\ \delta f = \alpha H + \eta$$

3. Выделение структурно-вещественных комплексов (СВК) – выделение групп горных пород, которые можно определить по выбранному комплексу геофизических методов.

4. Качественная интерпретация. Предварительное определение геометрических и физических параметров СВК, с небольшим объемом вычислений, без решения объемных обратных задач. Составление схем геофизических полей.

5. Количественная интерпретация для каждого метода – решение обратных задач для каждого физического поля с применением методов регуляризации. Создание однометодных объемных моделей. Увязка результатов истолкования данных полевых и скважинных измерений. Создание комплексных объемных моделей.

6. Комплексная интерпретация – согласование решений обратных задач. Выявление корреляционных связей между разными полями, между полями и геологическими границами. Результативные материалы содержат все объекты, выделенные по разным полям.

7. Геологическое истолкование – наделение геологическим содержанием выделенных объектов. Составление геолого-геофизических разрезов и трехмерных моделей.

8. Разработка рекомендаций для дальнейших исследований. Выделение перспективных участков для изучения в крупном масштабе.

Распознавание образов.

Любой метод истолкования геолого-геофизических данных, по сути, комбинация идеи аналитической аппроксимации и идеи распознавания образов. Распознавание образов предполагает создание образов, образов месторождений, структурно-вещественных признаков, тектонических нарушений, зон метасоматоза. Образ определен значениями интенсивности полей, характеристиками полей и. т. п т. е. набором признаков. Таким образом, первый этап распознавания - формирование набора признаков искомого объекта. Второй этап отнесение выявленного объекта к конкретному классу.

Один из алгоритмов классификации – ART1- **алгоритм адаптивного резонанса** предназначен для:

определение числа классов, максимально возможное число.

набор признаков класса, побитовый набор

отнесение объекта к классу.

1 Формирование группы векторов признаков для каждого класса. Вектор прототип относится к центру класса.

2 Вводится параметр внимательности ρ со значениями из интервала (0, 1).

3 β-параметр – параметр разрушения связей – небольшое положительное число.

4 Значимость вектора – количество элементов вектора не равных 0

5 Е-вектор признаков

Пример:

Алгоритм нейронные сети. Основы конструирования искусственных нейронных сетей. Искусственные нейронные сети чрезвычайно разнообразны по своим конфигурациям, но основу каждой НС составляют относительно простые, в большинстве случаев - однотипные, элементы (ячейки), имитирующие работу нейронов головного мозга. Далее под нейроном будет подразумеваться искусственный нейрон, т. е. ячейка НС. Каждый нейрон характеризуется своим текущим состоянием по аналогии с нервными клетками головного мозга, которые могут быть возбуждены или заторможены. Он обладает группой синапсов - однонаправленных входных связей, а также имеет аксон - выходную связь данного нейрона, с которой сигнал (возбуждения или торможения) поступает на синапсы следующих нейронов. Каждый синапс характеризуется величиной синаптической связи или ее весом *Wi*, который по физическому смыслу эквивалентен электрической проводимости.

Текущее состояние нейрона определяется как взвешенная сумма его входов:

$$S = \sum XiWi . \qquad (2.1)$$

Выход нейрона есть функция его состояния: $Y = f(S)$, где f- активационная функция.

Все НС работают по принципу параллельной обработки сигналов, который реализуется путем объединения большого числа нейронов в так называемые слои и соединения нейронов различных слоев, а также, в некоторых конфигурациях, и нейронов одного слоя между собой, причем обработка взаимодействия всех нейронов ведется послойно.

Теоретически число слоев и число нейронов в каждом слое может быть произвольным, однако фактически оно ограничено ресурсами компьютера или специализированной микросхемы, на которых обычно реализуется НС. На рис. 11.4 приведен пример трехслойной сети (трехслойного персептрона).

Вопрос о необходимых и достаточных свойствах сети для решения того или иного рода задач представляет собой целое направление нейрокомпьютерной науки. Так как проблема синтеза НС сильно зависит от решаемой задачи, дать общие рекомендации затруднительно. В большинстве случаев оптимальный вариант получается на основе интуитивного подбора.

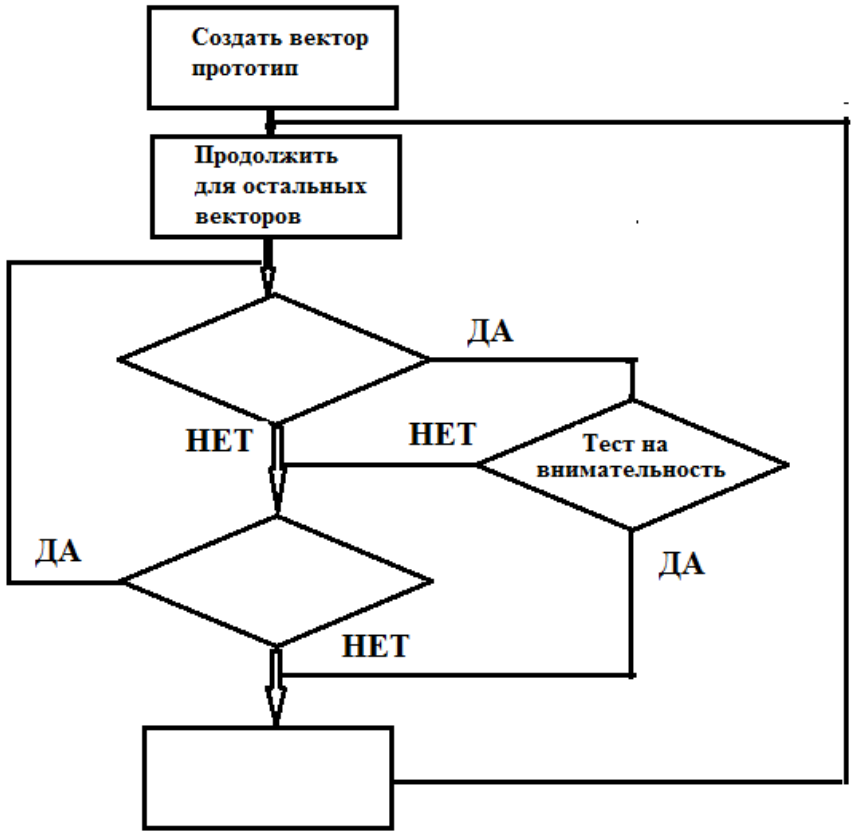


Рис. 11.4 Схема трехслойного персептрона.

ЛЕКЦИЯ 15 ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Метод исследований: математическое моделирование. Составлена трехслойная модель, отражающая различные уровни эрозионного среза. Проведено исследование модели.

Модель среды состоит из 9 блоков с размером сечения 400×400 м. Полный геологический разрез, представлен в центральном блоке рисунок 1, состоит из нижней свиты преимущественно андезитового состава мощностью 160 м с магнитной восприимчивость 200010 ед. СИ, средней свиты сложенной кислыми вулканитами мощность 160 м с магнитной восприимчивостью 0 ед. СИ, и верхний слой сложенный осадочными породами мощностью до 40 м с магнитной восприимчивость -1000 ед. СИ. На территории распространены дайки и штоки андезитов и дацитов, достигающие в поперечнике первых сотен метров. На участке широко проявлены процессы пропилитизации, окварцевания, аргилизации, сульфидизации, карбанитизации и гемотитизации.

Все остальные блоки составлялись в соответствии с эрозионным процессом, с уменьшением мощности верхнего слоя в 2 раза, допустимая минимальная мощность 20 м. Исходя из этих условий, были рассчитаны параметры геологической модели (табл. 1) по данным которой был составлен рисунок 1.

Таблица 1 – Параметры геологической модели.

№ Блока	№ Слоя	Глубина до верхней кромки, м	Глубина до верхней кромки, м	Магнитная восприимчивость среды ед. СИ
1	1	0	40	-1000
	2	40	200	0
	3	200	360	2000
2	1	0	20	-1000
	2	20	180	0
	3	180	320	2000
3	1	0	160	0
	2	160	320	2000
4	1	0	80	0
	2	80	160	2000
5	1	0	40	0
	2	40	200	2000
6	1	0	20	0
	2	20	180	2000
7	1	0	160	2000
8	1	0	80	2000
9	1	0	40	2000

Анализ результатов. Диапазон измерений поля модели совпадает с диапазоном измеренного поля. Наименьшее значение поля соответствуют полному геологическому разрезу. На плане изодинам можно заметить, что в южной части поле плавно возрастает с запада на восток, это отражает изменение глубины залегания положительно намагниченного пласта, и в действительности в составленной мной геологической модели (рис. 1) происходит эрозионный срез в направление с востока на запад, то есть положительная магнитная толща опускается в этом направлении. Причем на западе эту толщу на поверхности перекрывает небольшой слой осадочных пород, имеющий отрицательную магнитную восприимчивость, это так же отмечается на плане изодинам. Рассмотрев северную часть плана можно увидеть обратную картину, поле уменьшается с запада на восток, но с более высоким градиентом, нежели на юге, что является следствием уменьшения мощности намагниченного пласта. Сравнивая западную и восточную части плана изодинам, которые имеют большие значении поля, можно сделать вывод, что западная часть залегает ближе к поверхности, нежели восточная, так как максимальное значение поля в западной части на 100 нТл больше чем в восточной. Это подтверждается и заданной геологической моделью (рисунок 1), на ней блок 6 расположенный на западе имеет менее мощный, на 20 м меньше, верхний немагнитный слой, чем блок 5 расположенный на востоке.

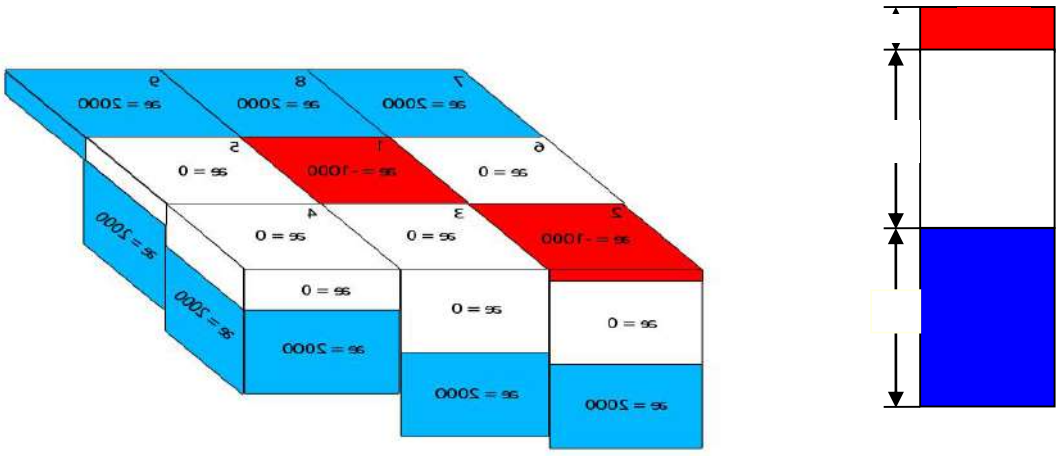
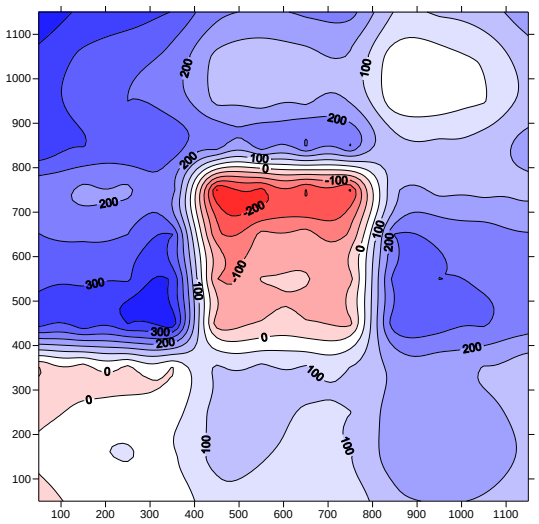
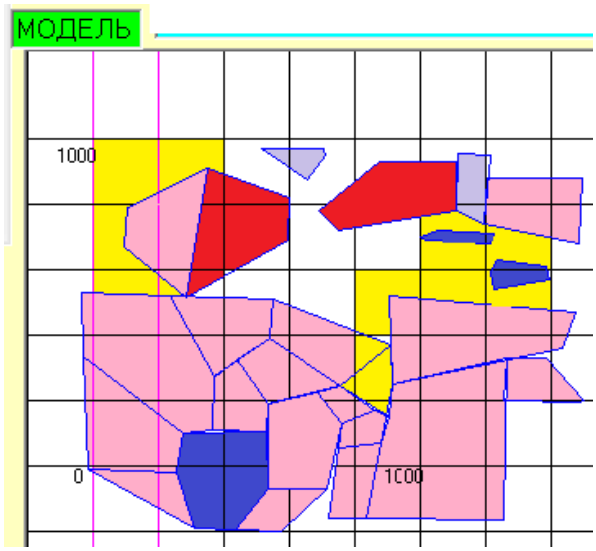


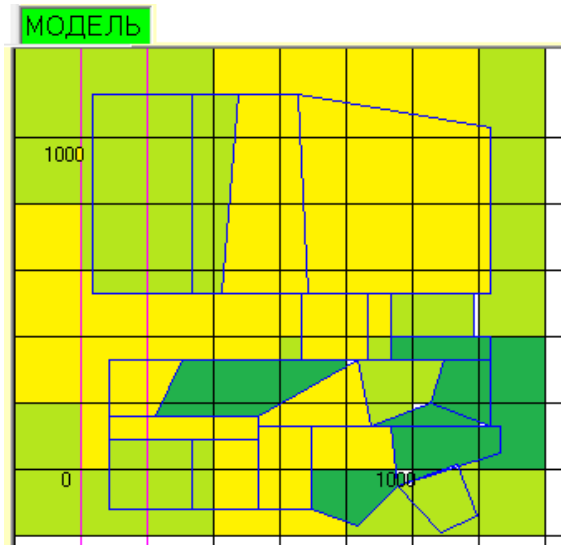
Рисунок 1 – Модель среды

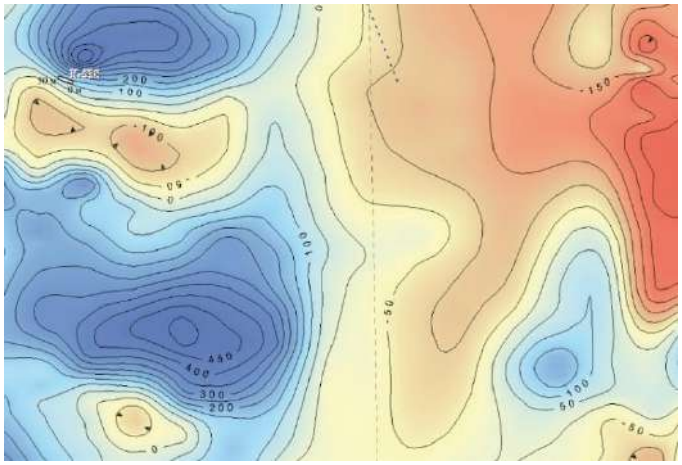


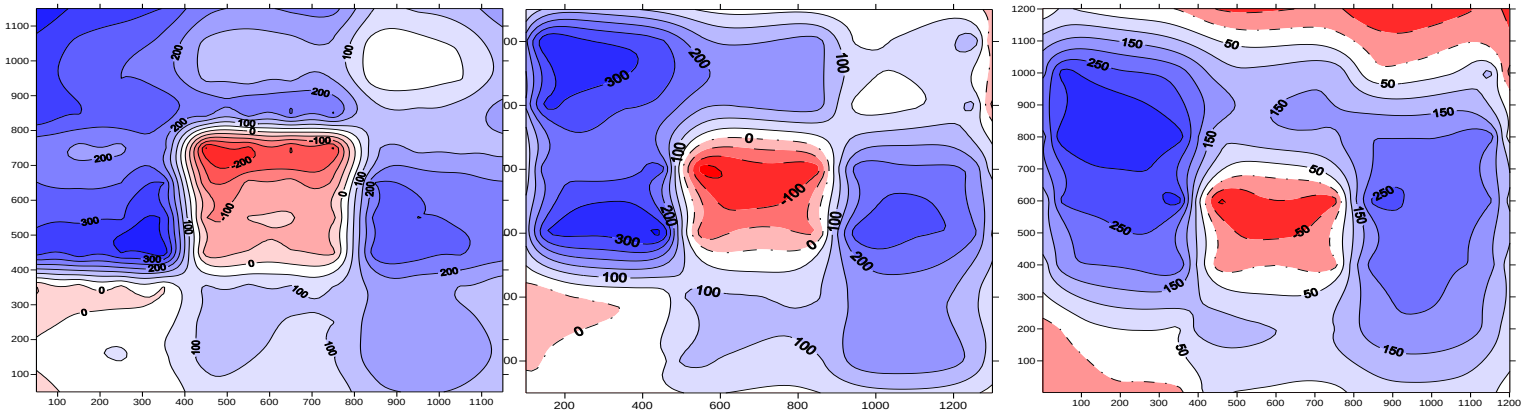
Штоки андезитов обусловливают положительные аномалии магнитного поля интенсивностью до 300 нТл. Штоки дацитов обусловливают аномалии до -200 нТл. Метосамотические изменения вблизи

интрузивных тел вызывают изменение интенсивности магнитных аномалий.
Выводы:

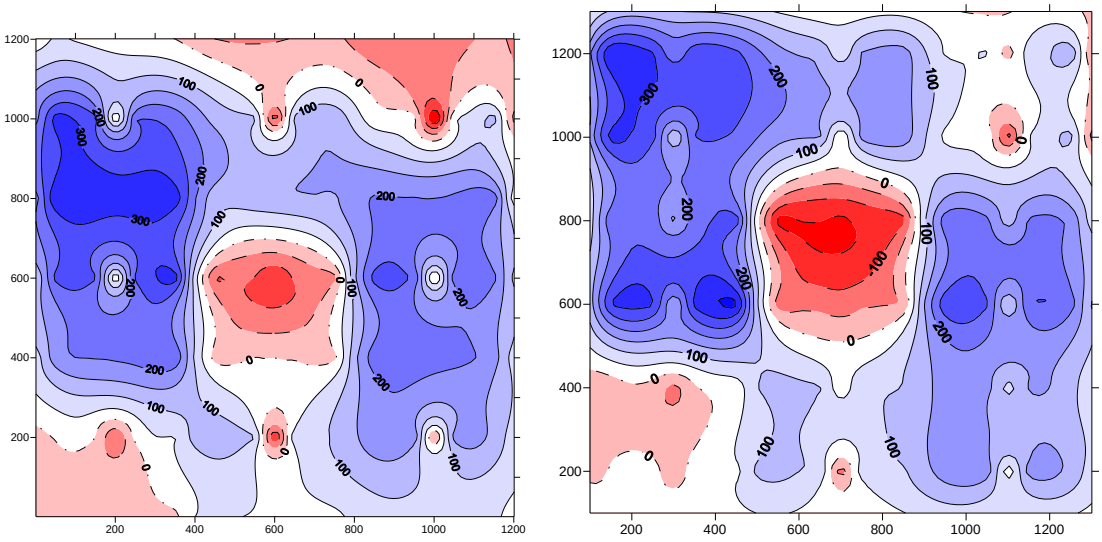


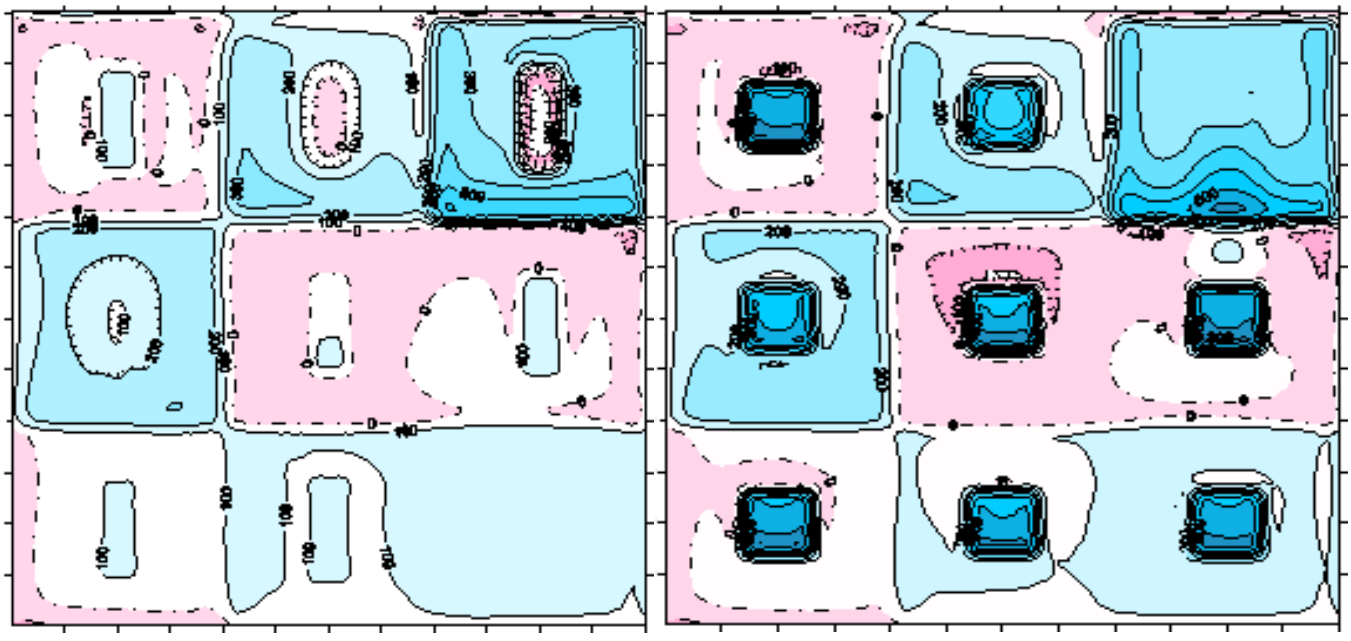






ВЛИЯНИЕ СЕТИ НАБЛЮДЕНИЙ


1200
1000
800
600
400
200
200
400
600
800
1000
1200



25 МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Ряды Фурье.

$$T_{ij} = \sum_{i=1}^{\infty}\sum_{j=1}^{\infty} a_{ij} \cos\frac{2\pi i x_i}{\Delta x}\cos\frac{2\pi j y_j}{\Delta y} + \sum_{i=1}^{\infty}\sum_{j=1}^{\infty} b_{ij} \cos\frac{2\pi i x_i}{\Delta x}\sin\frac{2\pi j y_j}{\Delta y} +$$

$$+ \sum_{i=1}^{\infty}\sum_{j=1}^{\infty} c_{ij} \sin\frac{2\pi i x_i}{\Delta x}\cos\frac{2\pi j y_j}{\Delta y} + \sum_{i=1}^{\infty}\sum_{j=1}^{\infty} d_{ij} \sin\frac{2\pi i x_i}{\Delta x}\sin\frac{2\pi j y_j}{\Delta y} +$$

$$a_{ij} = \frac{1}{h}\sum_{i=1}^{\infty}\sum_{j=1}^{\infty} T_{ij} \cos\frac{2\pi i x_i}{\Delta x}\cos\frac{2\pi j y_j}{\Delta y}$$

Решением уравнения Лапласа является потенциал $W(x,y,z) = e^{-iax-iby-cz}$, где $c^2 = a^2 + b^2$. Это решение может быть получено методом разделения переменных. Линейная комбинация таких функций с произвольными коэффициентами также будет решением уравнения Лапласа. В том числе решением будет:

$$W(x,y.z) = \frac{1}{4\pi^2}\iint_{P_1} S(a,b)e^{-cz-iax-iby}\,dadb \qquad (1),$$

где $S(a,b)e^{-cz}$ - преобразование Фурье функции $W(x,y,z)$ относительно переменных x и y. Обратное преобразование Фурье

$$S(a,b) = \iint_{P_0} e^{iax+iby} W(x,y)\,dxdy \qquad (2).$$

Измерения поля проводят в пунктах равномерно расположенных на изучаемой площади. После проведения процедуры интерполяции наблюденных данных получаем значения поля в узлах квадратной сети. Тогда гармоническая функция $W(x,y)-$ функция с ограниченным спектром, так как она известна только в узлах квадратной сети со стороной Δx. Поэтому она может быть представлена в виде функции значения которой в узлах совпадают с данными измерений:

$$W(x,y) = \sum_k\sum_n W(k\Delta x, n\Delta x)\frac{\sin\pi(x/\Delta x - k)}{\pi(x/\Delta x - k)}\frac{\sin\pi(y/\Delta x - n)}{\pi(y/\Delta x - n)}.$$

Преобразование Фурье функции $S(a,b)$ в квадрате $-\pi/\Delta x < a < \pi/\Delta x$, $-\pi/\Delta x < b < \pi/\Delta x$ можно записать:

$$S(a,b) = \Delta x^2 \sum_k\sum_n W(k\Delta x, n\Delta x)e^{k\Delta x i a + n\Delta x i b},$$

а вне квадрата она равна нулю.

Без ограничения общности рассуждений можно считать сторону квадрата равной единице. Тогда после подстановки получим:

$$W(x,y,z) = \frac{1}{4\pi^2}\iint_{P_1}\sum_k\sum_n W(k,n)e^{kai+nbi-cz-iax-iby}\,dadb = \sum_k\sum_n W(k,n)\iint_{P_1} e^{-iz+(k-x)ai+(n-y)bi}\,dadb,$$

где P_1 квадрат $-\pi < a,b < \pi$.

Принимаем $x = y = 0$, тогда

$$W(0,0,z)=\sum_k\sum_n W(k,n)\frac{1}{4\pi^2}\iint_{P_1} e^{-cz+kai+nbi}dadb.$$

Обозначим:

$$C(k,n)=\frac{1}{4\pi^2}\int_{-\pi}^{\pi} e^{-cz+kai+nbi}dadb,$$

получим:

$$W(0,0,z)=\sum_k\sum_n W(k,n)C(k,n).$$

Учитывая симметрию задачи область интегрирования можно уменьшить вчетверо, достаточно взять область $(0-\pi,0-\pi)$.

$$C(k,n)=\frac{1}{4\pi^2}\int\int e^{-cz}\left(e^{ika+nbi}+e^{-kai+nbi}+e^{kai-nbi}+e^{-kai-nbi}\right)dadb=\frac{1}{\pi^2}\int\int e^{-cz}\cos ka\cos nbdadb$$

Область интегрирования, учитывая симметрию относительно биссектрисы, квадрата можно уменьшить вдвое:

$$C(k,n)=\frac{1}{\pi^2}\int_0^{\pi}\cos kada\int_0^{a} e^{-cz}\cos nbdb+\frac{1}{\pi^2}\int_0^{\pi}\cos nb\int_0^{b} e^{-cz}\cos kada=$$

$$=\frac{1}{\pi^2}\int da\int_0^{a} e^{-cz}(\cos ka\cos nb+\cos na\cos kb)db.$$

Введем новую переменную $b=au$, получим:

$$C(k,n)=\frac{1}{\pi^2}\int_0^{\pi} ada\int_0^{1} e^{-az\sqrt{1+u^2}}(\cos ka\cos nua+\cos na\cos rua)du=$$

$$=\frac{1}{\pi^2}\int_0^{1} du\int_0^{\pi} e^{-az\sqrt{1+u^2}}(\cos ka\cos nau+\cos na\cos kua)ada.$$

Коэффициенты преобразования для продолжения поля можно найти численным интегрированием с помощью математических пакетов MATLAB, MathCad, Mathematica. Придавая z разные значения кратные расстоянию Δx, получим коэффициенты для вычисления поля в верхнем пространстве или в нижнем пространстве. Вычисленные коэффициенты можно использовать для продолжения гравитационного и магнитного полей. Изменение коэффициентов с удалением от начала координат характеризует корректность задачи, для продолжения в нижнее полупространство они очень медленно убывают по абсолютной величине.

Вертикальная производная потенциального поля (1) равна:

$$W_z=\frac{1}{4\pi^2}\iint_{P_1} S(a,b)e^{-cz-iax-iby}cdadb.$$

Повторяя те же рассуждения, получим выражения коэффициентов для вычисления вертикальной производной поля по измеренным значениям поля на горизонтальной плоскости в узлах квадратной сети:

$$C_0(k,n)=\int_{-1}^{1}\sqrt{1+u^2}\,\pi\left(\begin{array}{l}\left(\frac{1}{\pi^2(k+nu)^2}\right)\cos\pi(k+nu)+\left(\frac{1}{2}-\frac{1}{\pi^2(k+nu)^2}\right)\frac{\sin\pi(k+nu)}{\pi(k+nu)}+\\+\left(\frac{1}{\pi^2(n+ku)}\right)\cos\pi(n+ku)+\left(\frac{1}{2}-\frac{1}{\pi^2(n+ku)^2}\right)\frac{\sin\pi(n+ku)}{\pi(n+ku)}\end{array}\right)du$$

Величины этих коэффициентов вновь можно вычислить численным интегрированием. Например, $C_0(0,0) = 2{,}40493$. Окончательные значения коэффициентов зависят от расстояния между узлами сети наблюдения. Поэтому для конкретной сети наблюдения коэффициенты необходимо разделить на Δx, $C(k,n) = C_0(k,n)/\Delta x$. С помощью свертки полученных коэффициентов с гравитационным полем можно по наблюденному полю силы тяжести вычислить псевдомагнитное поле.

Чтобы вычислить вторую вертикальную производную наблюденного поля для расчета коэффициентов $C_{zz}(k,n)$ дифференцируем решение уравнения Лапласа дважды по z:

$$V_{zz} = \frac{1}{4\pi^2}\iint_{P_1} S(a,b)e^{-cz-iax-iby}c^2 dadb,$$

$$C_{zz}(k,n) = \iint_{P_0} e^{-cz+ika+inb}c^2 dadb, \quad -\pi < a < \pi,\ -\pi < b < \pi.$$

Для поверхности наблюдений $z = 0$:

$$C_{zz}(k,n) = \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} a^2 \cos ka da \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} \cos nb db + \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} \cos ka da \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} b^2 \cos nb db.$$

$$C_{zz}(0,0) = \frac{2\pi^2}{3}, \quad C_{zz}(k,0) = (-1)^k \frac{2}{k^2}, \quad k,n \neq 0 \quad C_{zz}(k,n) = 0.$$

2 АКФ

$$B(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) f(x-\tau) dx, \qquad B_H = B(\tau)/B(0), \quad R(m) = \frac{1}{n-|m|}\sum_{i=1}^{n-|m|}(Z_i - \bar{Z})(Z_{i+m} - \bar{Z}).$$

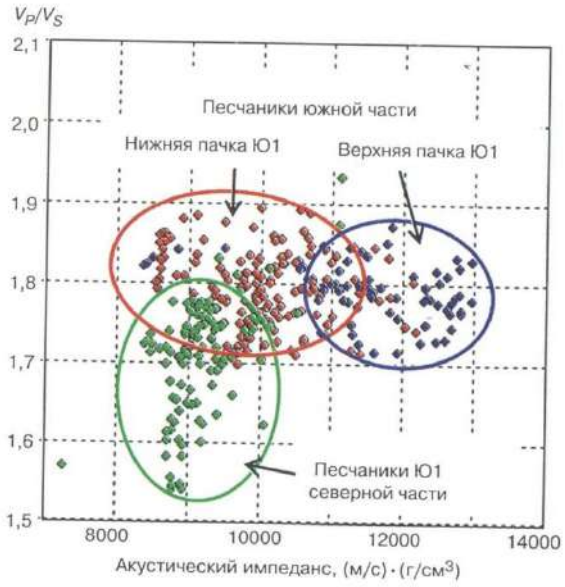


Рис. 1. Упругие свойства песчаных пород в северной и южной частях площади

3 Спектры

$$S(\omega)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}f(x)e^{-i\omega x}dx, \qquad f(x)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}S(\omega)e^{i\omega x}d\omega.$$

$$S(k)=\Delta x\sum_{0}^{N-1}f_j e^{-ij2\pi k/N}, \qquad f_j=\frac{1}{N\Delta x}\sum_{0}^{k=N-1}S(k)e^{ij2\pi k/N}.$$

4 Вейвлет-анализ

Для обработки экспериментальных данных в последние 20 лет в гравиразведке, магниторазведке, электроразведке, сейсморазведке и других отраслях геофизики применяют вейвлет-анализ. Вейвлет-анализ применяют для изучения нестационарных процессов. В отличие от Фурье-анализа вейвлет-анализ обеспечивает привязку источника в пространстве. При проведении вейвлет-анализа использует три параметра: масштаб, положение и направление. Исходные данные сравниваются со стандартными сигналами – вейвлетами $\Psi(x)$. Вйвлетом (в дословном переводе "маленькая волна", в отечественной литературе используется также термин всплеск) называют осциллирующую функцию, отличную от 0 на небольшом промежутке, удовлетворяющую условию:

$$\int_{-\infty}^{\infty}\Psi(x)=0.$$

Выделяют семейства все подобные вейвлеты которого получают умножением на масштабный множитель. Для вейвлетов определяют непрерывное, дискретное и быстрое вейвлет преобразования (НВП, ДВП, БВП).

Вейвлет-преобразование определяется выражением:

$$(W_\psi f)(\sigma,\tau)=\int_{-\infty}^{+\infty}f(x)\frac{1}{\sqrt{|\sigma|}}\psi\left(\frac{x-\tau}{\sigma}\right)dx,$$

где σ – параметр масштаба, τ - параметр сдвига. Обратное вейвлет-преобразование:

$f(x)=\frac{1}{C_\psi}\int_{-\infty}^{+\infty}(W_\psi f)(\sigma,\tau)\psi_{\sigma,\tau}(x)\frac{1}{\sigma^2}d\sigma d\tau$, где $C_\psi=\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{|\psi(\omega)|}{\omega^2}d\omega$.

Основная идея вейвлет-анализа заключается в представлении дискретной функции *f(x)*, заданной на отрезке *R* оси абсцисс, в виде следующего ряда: $f(x)=\sum_{i=1}^{N}c_i\psi_i(x),$ где в качестве базисной системы функций $\{\psi_i(x):i=1,2,\ldots,N\}$ используются перемещаемые по оси координат *x* и масштабируемые (сжатые или растянутые по оси *x*) однотипные функции с компактным носителем. Вейвлет-коэффициенты определяются скалярным произведением сигнала на вейвлет-функцию заданного типа $c(s,n)=\int_R f(x)s^{-1/2}\psi\left(\frac{x-n}{s}\right)dx$, где *s* - масштаб, *n* - сдвиг. Метод нахождения вейвлет-коэффициентов на основе описанного интеграла свертки

называется непрерывным вейвлет-преобразованием (НВП). НВП позволяет решать задачу преобразования наблюденного гравитационного поля в масштабно-сдвиговую область с целью единого представления его частотных и пространственных характеристик. Можно выделить три основных элемента в этих исследованиях: анализ наблюденного гравитационного поля; представление данных об изучаемом объеме геологической среды; решение систем линейных алгебраических уравнений, возникающих при решении обратной задачи гравиметрии.

По существу эти стандартные сигналы отличны от нуля на небольшом интервале и имеют нулевое интегральное среднее. Вейвлетами , например, являются производные функции Гаусса:

$$g(x) = e^{(-t^2/2)}.$$

Для анализа гравитационных и магнитных поле применяется вейвлет:

$$mhat(x) = (1 - x^2)e^{-x^2/2}.$$

Система функций не является полной и ортогональной, поэтому восстановление сигнала по его спектру не всегда возможна. Алгоритм вейвлет-анализа основан на свертке поля силы тяжести с вейвлет-функцией в скользящем окне разного размера при различных сдвигах. Сдвиг по оси абсцисс берут кратным шагу наблюдений поля. Вейвлет масштабируют в соответствии с условиями задачи. Свертка производится перемножением спектров поля и вейвлета.

Вейвлет-анализ в отличие от Фурье-анализа предназначен для изучения нестационарных процессов. Другим отличием вейвлет-анализа является привязка в пространстве.

Построение вейвлет-спектров на основе НВП позволяет:

1. Локализовать в пространстве особенности поля, обусловленные геологическими объектами разного ранга (в т.ч. и визуально не выявляющимися).

2. Оценить энергетический вклад каждой частотной компоненты поля при сохранении привязки выделенных компонент к реальным пространственным координатам.

3. На основе взаимосвязи между масштабом вейвлета и глубиной залегания сингулярного источника определять эффективные параметры возмущающих объектов.

17. РАСПОНАВАНИЕ ОБРАЗОВ

Под распознаванием образов (анализом многомерных данных) подразумевают создание по совокупности геолого-геофизических признаков образа изучаемых объектов и выявление этих объектов на исследуемых территориях. Синонимы термина образ:

- кластер, группа элементов, характеризующихся общим свойством,
- таксон, систематизированная группа любой категории.

В качестве образа может быть рудный район, рудный узел, рудное поле, месторождение, рудное тело, нефтяная залежь, месторождение нефти.

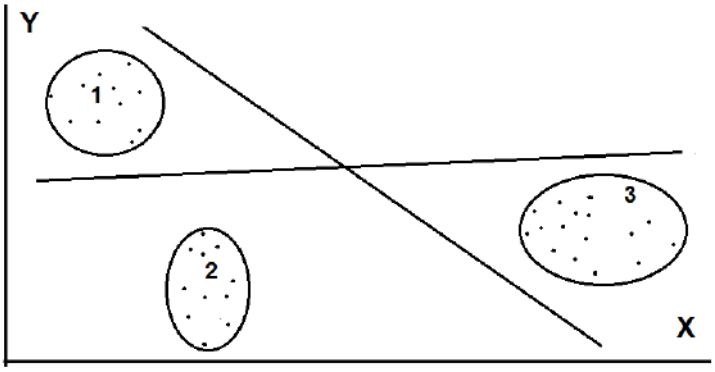


Рис. 1 Выделение областей в признаковом пространстве

Выделяют две задачи распознавания:

1. Совокупность элементов разбивают на небольшое число классов
2. Определение естественного расслоения исходных данных.

Во втором случае решения может не существовать

Для решения задачи распознавания используются:

Эвристический подход – разбиение на классы на основе интуиции исполнителя.

Оптимальный подход – разбиение на классы на основе заданного критерия разбиения.

Статистический подход - разбиение на классы на основе вероятностного подхода, использования понятия случайной величины.

При распознавании по эталонам с обучением, выбор эталонов определяет результат распознавания. Как правило, число эталонов по исследуемому району невелико, поэтому их дополняют эталонами по аналогичным объектам из других регионов.

Обычной формой представления данных при решения задач распознавания служит прямоугольная таблица, строки которой соответствуют объектам, а столбцы – признакам.

Наиболее простой подход использование интегрального показателя. Разбиение возможно по нескольким показателям.

Определение набора признаков может проводиться на основе группы эталонных объектов, либо без них исходя из теоретических представлений и опыта работ на других объектах.

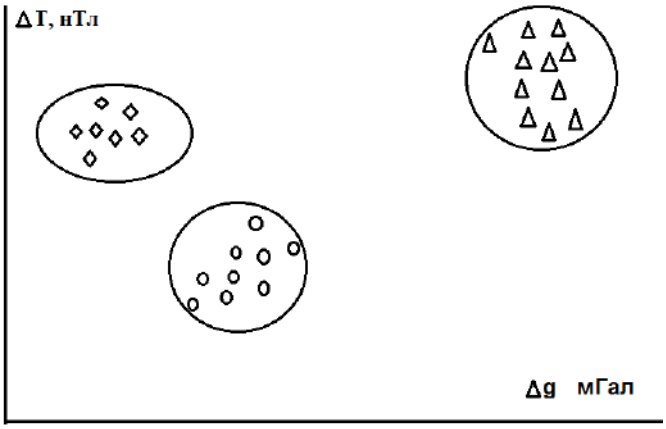


Рис. 2 Выделение классов

Наиболее простой пример – разделение горных пород на группы по величине физического параметра. Например, деление на коллекторы и неколлекторы по величине пористости. В этом случае строят полигоны частот, и разделение проводят так, чтобы возможность совершить ошибки первого рода и второго рода были одинаковы. При построении полигонов частот соблюдают следующие правила, сформулированные на основе многолетней практики:

1. Число интервалов группирования не меньше 6.
2. Число интервалов группирования не больше 12.
3. Частота в каждом интервале не может быть меньше 5.
4. Гистограммы построенные по практическим данным нередко имеют полимодальную форму.

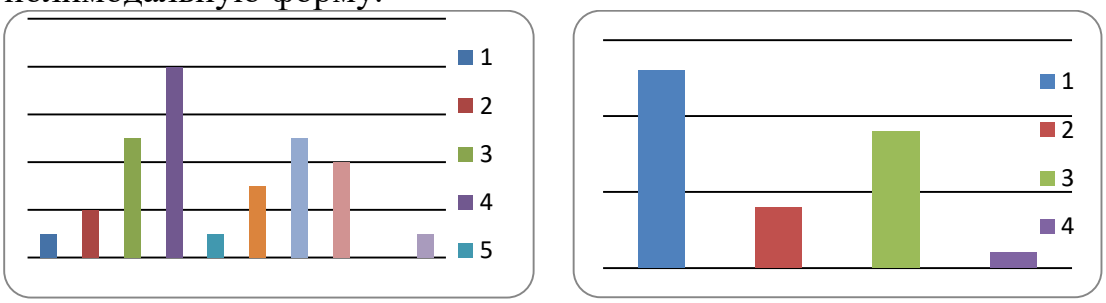


Рис. Гистограммы измеренных полей

Иногда, чтобы скрыть степень неопределенности используют интегральную кривую для одной группы пород и дополнение интегральной кривой для другой группы пород.

Важнейший элемент такого подхода – определение набора признаков. Выбор ограничивается имеющимися данными, в очень редких случаях проводятся дополнительные исследования. В качестве геологических признаков выбирают, например, наличие мантийного корня, наличие интрузивных пород кислого состава, вечной мерзлоты, зон метасоматоза, зон деструкции, геологических структур, тектонических нарушений и их пересечений, карбонатизация, различные рудоконтронтролирующие факторы и другие. В качестве геофизических признаков могут использоваться: интенсивность регионального поля, интенсивность локальной аномалии, вертикальный градиент поля силы тяжести, энтропия, горизонтальный градиент поля, форма аномалии, сочетание

аномалий разных полей, аномалия трубочного типа. Эффективная плотность, эффективная намагниченность.

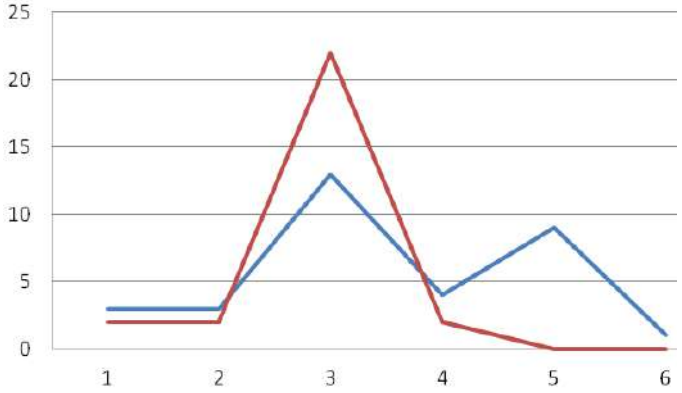


Рис. 3

Из выше приведенных примеров следует, что признаки существенно различаются между собой. Для некоторых из них можно указать численное значение (интенсивность аномалии – 5 мГал, величина градиента поля 2 мГал/км). Для других можно создать шкалу и расположить их в определенной последовательности, а затем указать место объекта в этой последовательности. Таким переменным можно поставить в соответствие число натурального ряда. Такие переменные называют категоризированными или порядковыми или ранговыми.

Для многих геологических данных нельзя сделать ни того ни другого, эти признаки качественные. Им нельзя поставить в соответствие число. Такие дихотомические переменные принимают только два значения: есть – нет, плюс – минус.

Признаки, используемые при поисках алмазов:

1. Наличие мантийного корня.
2. Пересечение боле трех разломов.
3. Пониженное региональное поле
4. Повышенное гравитационное поле
5. Положительная магнитная аномалия.
6. Отрицательная гравитационная аномалия.

Необходимо учитывать взаимосвязь между признаками, чтобы один и тот же фактор не учитывался дважды. Для анализа связи двух признаков составляют таблицу:

	ΔT +	ΔT -	Маргинальные частоты (сумма)
G -	77	6	107
G +	75	32	83
Маргинальные частоты (сумма)	152	38	190

$$\chi^2 = N\sum_i\sum_j \frac{f_{i,j}^2}{f_i f_j} - N$$

X^2= (77*32-75*6)^{2}190/(152*38*83*107)=0,08

Для анализа связанности признаков в многомерном случае составляют матрицы сопряженности (инциденций):

	a	b	c	d	e	Сумма
А	f_{11}	f_{12}	f_{13}	f_{14}	f_{15}	M_1
Б	f_{21}	f_{22}	f_{23}	f_{24}	f_{25}	M_2
В						M_3
Г						M_4
Сумма	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	N

Критерии связанности

$$P = \sqrt{\frac{\chi^2}{N+\chi^2}},\quad T = \sqrt{\frac{\chi^2}{N(K_\Sigma - M_\Sigma)(M_\Sigma - 1)}},\quad C = \sqrt{\frac{\chi^2}{N(\min(K_\Sigma, M_\Sigma - 1)}}$$

Распознавание может осуществляться по расстоянию между классами в много мерном пространстве, поэтому необходимо определить характеристику определяющую меру близости между классами и объектами. Эту характеристику принято именовать расстоянием:

Расстояние Мехаланобиса

Евклидово расстояние

Взвешенноне евклидово расстояние

Расстояние по Хеммингу, отражает расстояние между объектами определяемыми дихотомическими признаками:

$$R = \sum_l (X_i - X_j)$$

$$x = \sqrt{(b\text{^}2 - 4ac)}$$

либо на основе построенного решающего правила

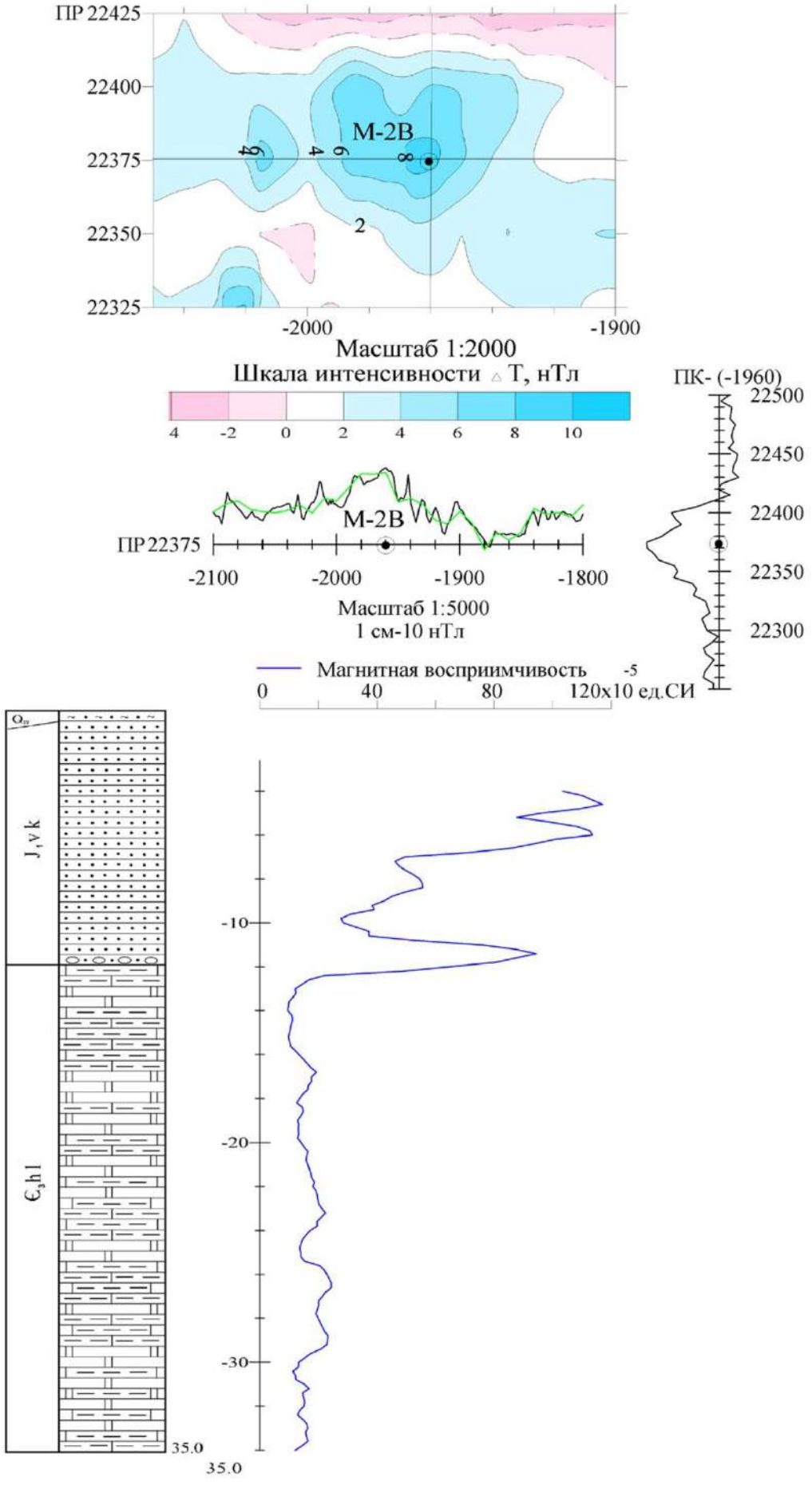


Рис. Выделение кимберлитовых трубок

Методообразующая идея: любой метод истолкования геоданных основывается на комбинации идеи аналитической аппроксимации и идеи использования распознавания образов.

Эффективное истолкование математическими методами невозможно в силу недоопределенности имеющейся информации, неустойчивости и неединственности решений обратных задач гравиразведки и магниторазведки. Аоэтому компьютерные технологии включают в себя процедуры, основанные на распознавании образов. Близкие задачи к распознаванию задачи классификации: районирование полей по морфологии (типам), создание типовых модельных полей.

Распознавание образов применяют при решении задач геологического картирования (число классов большое), нефтяной геофизики (число классов 2), рудной геофизики (число классов 2). При эвристическом подходе к задаче распознавания набор признаков проводит исследователь, интуитивно исходя из своего опыта. Далее создают уравнение вида

$$f = k_1x_1 + k_2x_2 + k_3x_3 + k_4x_4 .....$$

где k_i и x_i вес признака и значение признака (число, ранг, при дихотомии 0 или 1)

Коэффициенты k_i в таком уравнении подбираются экспериментальным путем последовательным включением в регрессионную модель новых признаков с одновременной проверкой целесообразности их включения.

1. Вычисляется матрица парных коэффициентов корреляции всех признаков.
2. Выбирается наиболее значимая переменная
3. Проводится дисперсионный анализ.
4. Вычисляется матрица коэффициентов корреляции для оставшихся признаков.
5. Выбирается следующий признак.

Включение признаков проводится проводится до исчерпания всех признаков, либо до превышения табличного значения критерия Фишера.

Полученное значение критерия определяет принадлежность объекта (точки, участка) к тому или иному классу. Эффективность решающего правила определяется на известных объектах.

Если признаки характеризуются числом, то процесс деления на классы можно организовать следующим образом. Меру сходства между признаками можно характеризовать матрицей парных коэффициентом корреляции.

	А	Б	В	Г	Д
А	1	0,33	0,25	0,55	0,10

Б	0,33	1	0,63	0,07	0,14
В	0,25	0,63	1	0,21	0,72
Г	0,55	0,07	0,21	1	0,22
Д	0,10	0,14	0,72	0,22	1

Далее объединяем элементы Д и В и для новых элементов вычисляем матрицу парных коэффициентов корреляции.

Иерархические (древообразные) кластер-процедуры широко используются в многомерном анализе. В таких процедурах либо начальное разбиение на классы в процессе деления приводит в конечном счете к множеству одноэлементных классов, либо одноэлементные классы объединяются до создания одного класса. Разбиение проводится на основе принятого правила определения расстояния между элементами. Вычислительные процедуры очень громоздкие.

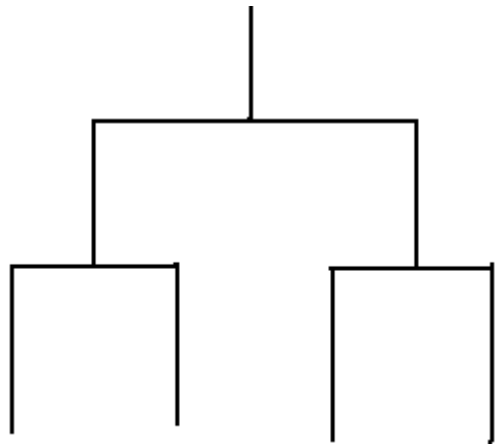
Пример. На первом этапе каждое измерение рассматривается как отдельный кластер. Далее определяются расстояния между всеми элементами. Затем два ближайших элемента объединяются в единый кластер.

	1	2	3	4
А	5	8	6	9
Б	6	9	5	7

Матрица расстояний

0	4,3	1,41	4,2
4,3	0	4,4	2,1
1,41	4,4	0	2,1
4,2	2,1	2,1	0

Объединяем 3 и 4 элементы



Дендограмма

В многомерный анализ включают процедуру анализа равенства средних векторов нескольких наборов данных. Метод главных компонент.

Факторный анализ.

Если признак принимает только два значения, то для его описания можно использовать биномиальное распределение. Оценки математического ожидания и среднеквадратического отклонения

Для 95% надежности t=1,96. Для оценки связи между признаками определяется точным критерием Фишера

Мерой степени сходства между признаками

Коэффициенты связанности Юла

Рассмотрим частоты двух дихотомических признаков FLT и NPM1

	FLT+	FLT-	Маргинальные частоты
NPM1+	4	5	9
NPM1-	4	41	45
	8	46	54

Точный критерий Фишера=7,51

Мера сходства Ф=0,37. Коэффициенты связанности Q=0,76 Y= 0,48

Признаки слабо связаны

Признаки

	NPM1+	NPM1-	
KIT+	1	7	8
KIT-	2	34	36
	3	41	44

Значение точного критерия Фишера=0.50 Мера сходства Ф=0.1 Коэффициенты связанности

Обобщенная схема иерархической оценки перспективных площадей, выделяемых на прогнозно-геофизических картах

- Анализ результирующих прогнозно-геофизических карт, построенных методом аналогий с использованием различных эталонов («натурных», «модельных», «ситуативных»;
- Пространственное сопряжение перспективных площадей с элементами структурно-тектонического строения, выявленными по комплексу данных;
- Непротиворечивость прогнозных построений общей геологической модели перспективной территории;
- Пространственная совмещенность прогнозируемых объектов разных иерархических уровней (рангов);

- Использование минерагенической информации в качестве «внешнего» критерия оценки результатов геофизического прогноза

- Детализация общей геологической модели перспективной территории в виде содержательных текстовых и картографических описаний (качественных признаков)

Многоуровневый прогноз на основе последовательной пространственной совмещенности аномальных геологических объектов соседних иерархических уровней (конгруэнтности)

ВНИМАНИЕ! Усреднение вероятностей правомерно лишь при сравнительно одинаковой информативности используемых геофизических критериев прогноза. В противном случае результаты интерпретации с использованием формальной оценки перспективности могут оказаться ошибочными (переоцененная перспективность одних площадей и недооцененная перспективность других).

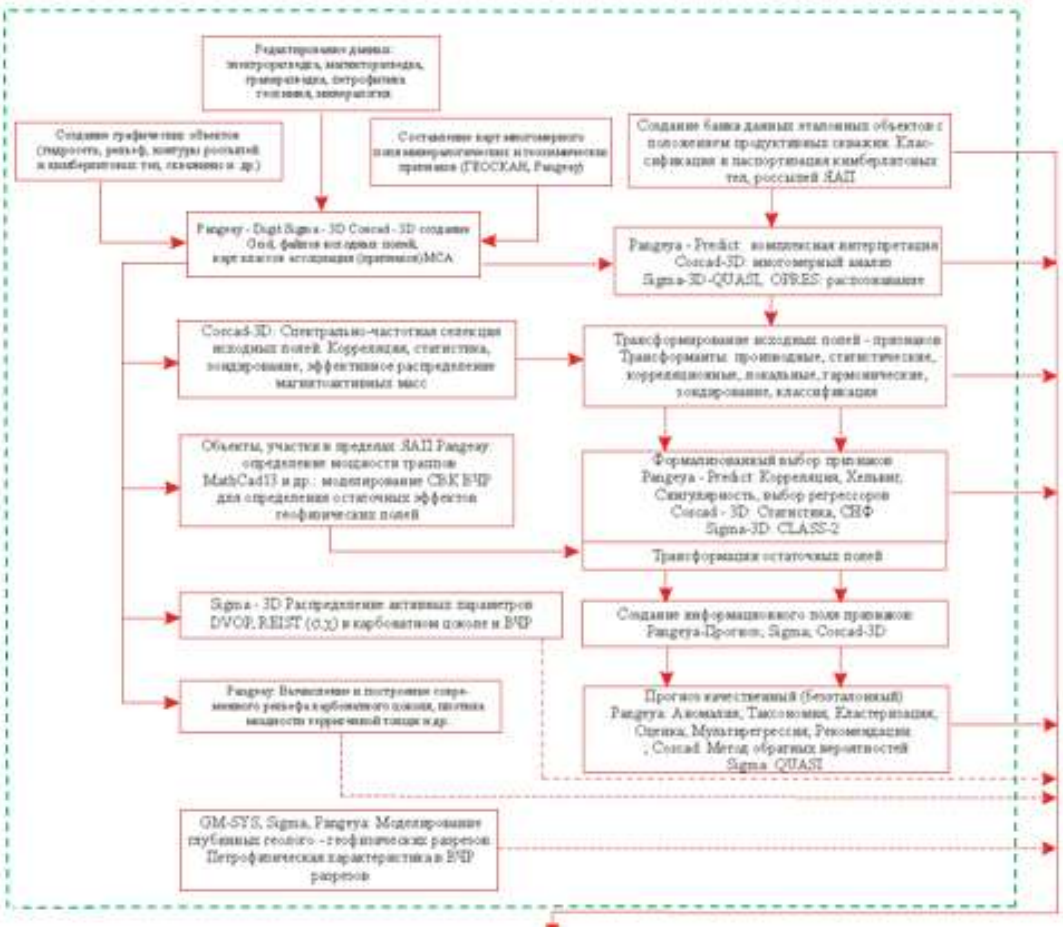
Результаты формализованной камеральной оценки перспективных площадей пространственно сопрягаются с имеющимися в наличии слоями минерагенической информации и позволяют обоснованно выбирать *интерпретационные* профили в качестве прообразов реальных заверочных профилей

При оценке перспективных площадей настоятельно рекомендуется использовать статистические алгоритмы с возможностью учета *различной* информационной содержательности геоданных. Использование вероятностных моделей соответствует нечетким представлениям об искомых объектах прогноза в реальных геологических условиях

Для сокращения многозначности при сопоставлении результатов прогнозного районирования перспективных территорий, обусловленной несоответствием применяемых моделей реальным геологическим объектам, предлагается *синтез* автоматизированных методов безэталонной и эталонной классификации

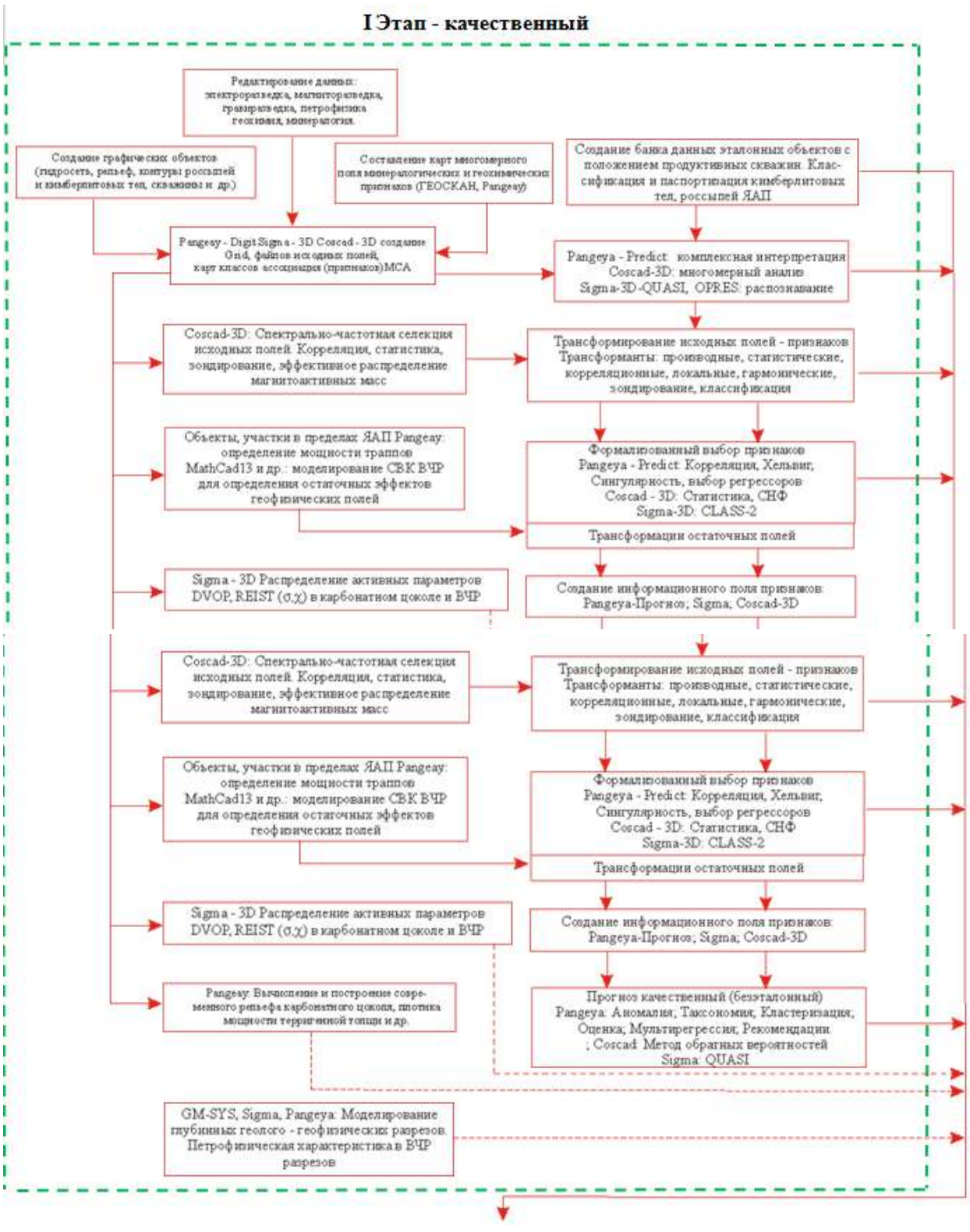
Блок-схема многомерной интерпретации геолого-геофизических данных для ЯАП

I Этап - качественный



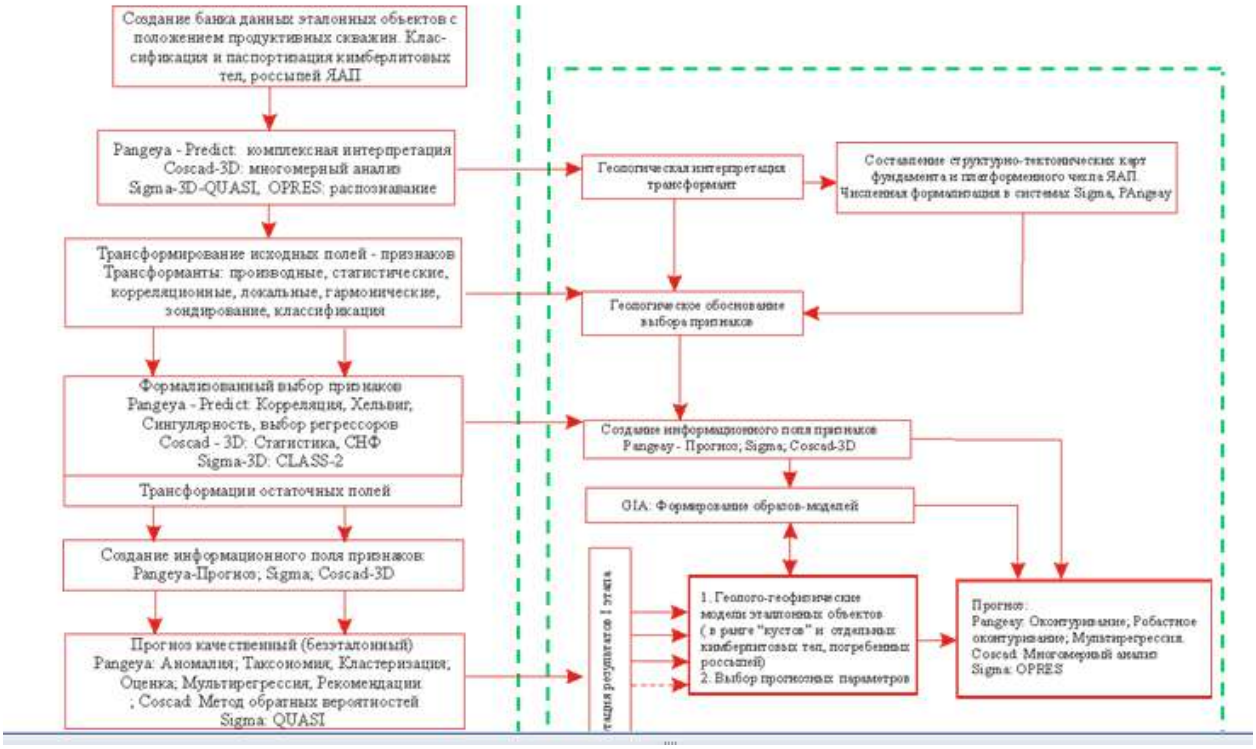
Результаты I этапа

1. Трансформации остаточных полей
2. Карта таксонов
3. Карта кластеров
4. Карта безэталонной классификации
5. Карта распределения статистических параметров
6. Карта перспективности участков


I Этап - качественный
Редактирование данных: электроразведка, магниторазведка, гравиразведка, петрофизика геохимия, минералогия
Создание графических объектов (гидросеть, рельеф, контуры россыпей и кимберлитовых тел, скважины и др.)
Составление карт многомерного поля минералогических и геохимических признаков (ГЕОСКАН, Pangeay)
Создание банка данных эталонных объектов с положением продуктивных скважин. Классификация и паспортизация кимберлитовых тел, россыпей ЯАП
Pangeay - DigitSigma - 3D Coscad - 3D создание Grid, файлов исходных полей, карт классов ассоциации (признаков)МСА
Pangeya - Predict: комплексная интерпретация Coscad-3D: многомерный анализ Sigma-3D-QUASI, OPRES: распознавание
Coscad-3D: Спектрально-частотная селекция исходных полей. Корреляция, статистика, зондирование, эффективное распределение магнитоактивных масс
Трансформирование исходных полей - признаков Трансформанты: производные, статистические, корреляционные, локальные, гармонические, зондирование, классификация
Объекты, участки в пределах ЯАП Pangeay: определение мощности траппов MathCad13 и др.: моделирование СВК ВЧР для определения остаточных эффектов геофизических полей
Формализованный выбор признаков Pangeya - Predict: Корреляция, Хельвиг, Сингулярность, выбор регрессоров Coscad - 3D: Статистика, СНФ Sigma-3D: CLASS-2
Трансформации остаточных полей
Sigma - 3D Распределение активных параметров DVOP, REIST (σ,χ) в карбонатном цоколе и ВЧР
Создание информационного поля признаков: Pangeya-Прогноз; Sigma; Coscad-3D
Coscad-3D: Спектрально-частотная селекция исходных полей. Корреляция, статистика, зондирование, эффективное распределение магнитоактивных масс
Трансформирование исходных полей - признаков Трансформанты: производные, статистические, корреляционные, локальные, гармонические, зондирование, классификация
Объекты, участки в пределах ЯАП Pangeay: определение мощности траппов MathCad13 и др.: моделирование СВК ВЧР для определения остаточных эффектов геофизических полей
Формализованный выбор признаков Pangeya - Predict: Корреляция, Хельвиг, Сингулярность, выбор регрессоров Coscad - 3D: Статистика, СНФ Sigma-3D: CLASS-2
Трансформации остаточных полей
Sigma - 3D Распределение активных параметров DVOP, REIST (σ,χ) в карбонатном цоколе и ВЧР
Создание информационного поля признаков: Pangeya-Прогноз; Sigma; Coscad-3D
Pangeay: Вычисление и построение современного рельефа карбонатного цоколя, плотика мощности терригенной толщи и др.
Прогноз качественный (безэталонный) Pangeya: Аномалия, Таксономия, Кластеризация, Оценка; Мультирегрессия, Рекомендации ; Coscad: Метод обратных вероятностей Sigma: QUASI
GM-SYS, Sigma, Pangeya: Моделирование глубинных геолого - геофизических разрезов. Петрофизическая характеристика в ВЧР разрезов

Блок-схема многомерной интерпретации геолого-геофизических данных для ЯАП

II Этап - интерпретация



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

Виноградов В.Б.

ПРАКТИКУМ ПО ДИСЦИПЛИНЕ ГЕОМЕТРИЗАЦИЯ И АНАЛИЗ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Специальность

21.05.03 Технология геологической разведки

Екатеринбург
2020

В пособии описаны практические работы по дисциплине «Геометризация и анализ физических полей. Учебным планом предусмотрено проведение занятий по 3 разделам курса:

- аналитическое описание геологических поверхностей и физических полей,
- подсчет ресурсов,
- анализ физических полей.

Половина из них проводится в компьютерном классе кафедры геофизики с применением математических пакетов для расчетов.

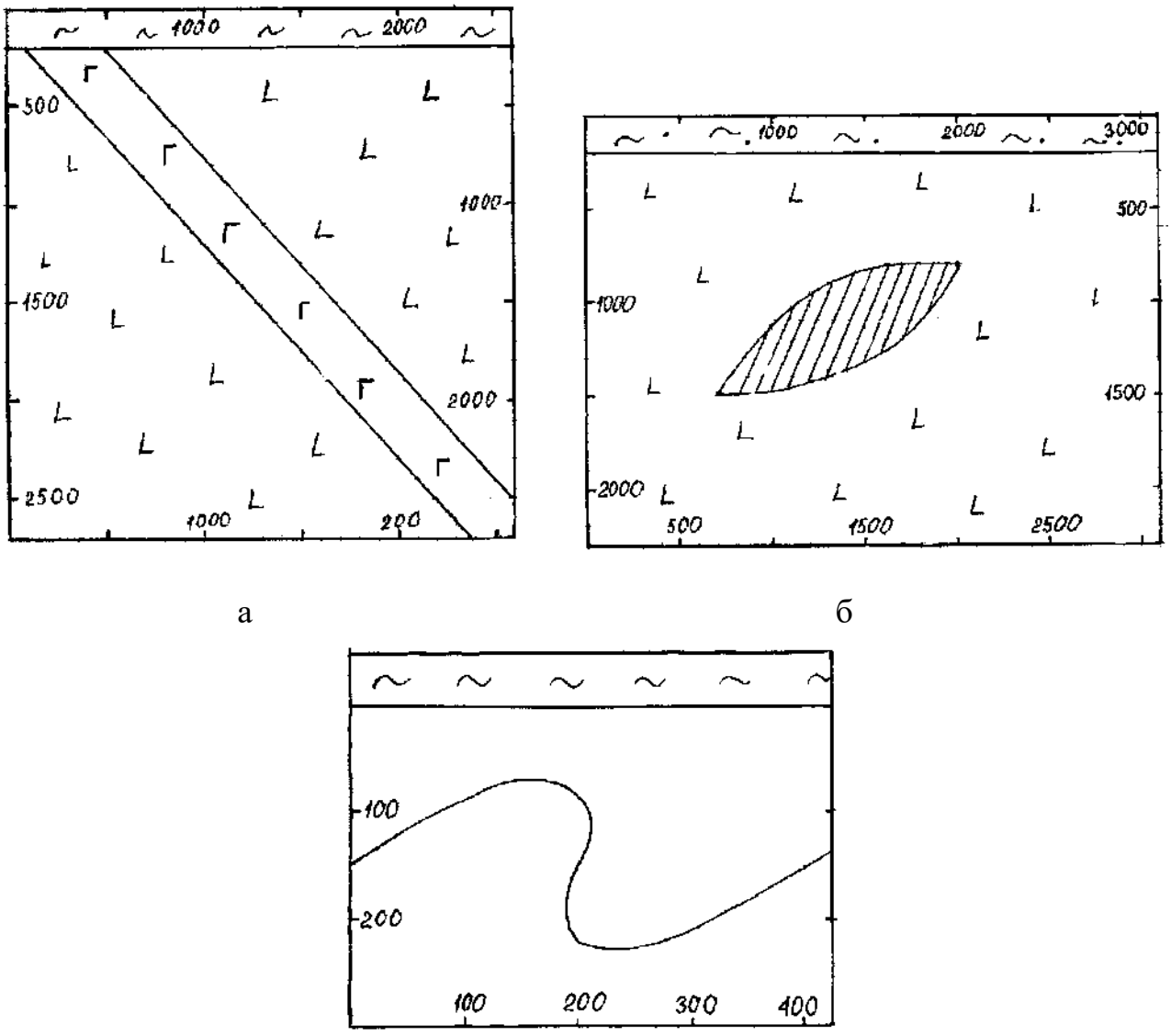
Практическое занятие №1 Описание поверхностей геологических объектов

Цель работы: Составить аналитическое описание геометрии геологического разреза.

1) Для представленного разреза (см. рис. 1а) составить линейные уравнения $z=ax+b$, описывающие поверхности дайки порфиритов.

2) Для локального геологического объекта (батолита, лакколита и т.д.) составить уравнения полиномов второго порядка $z=ax^2+bx+c$, описывающие его нижнюю и верхнюю поверхности.

3) Составить параметрические уравнения $x=t+asint$, $z=bsint$, описывающее поверхность складки (рис. 1в).



а б

в

Рис. 1 Примеры поверхностей, предлагаемых в качестве задания

Результаты работы представить в виде разреза, уравнений и неравенств для параметров уравнений.

Рис. 2 Образец оформления работы

Практическое занятие № 2 Описание геологической поверхности кубическими сплайнами (4 часа)

Для заданных результатов измерений построить кубические сплайн-функции 1, 2, и 3 порядка.

Таблица 1 Варианты работ

Вариант	X	Y	Вариант	X	Y	Вариант	X	Y	Вариант	X	Y
1	1	4,2	3	0	2,2	5	1	2,4	7	0	3,2
	2	4,2		1	2,3		2	2,7		1	4,3
	3	5,2		2	3,0		3	2,5		2	3,0
	4	4,0		3	3,0		4	0,4		3	1,0
	5	5,3		4	2,0		5	3,5		4	2,2
2	0	5,0	4	0	5,5	6	0	4,0	8	0	7,5
	1	4,5		1	1,0		1	4,9		1	3,0
	2	4,7		2	0,5		2	4,7		2	4,5
	3	1,7		3	1,0		3	5,7		3	2,0
	4	2,3		4	0,5		4	3,3		4	0,9
9	1	6,3	10	1	7,2	11	1	3,3	12	1	2,5
	2	6,8		2	5,5		2	5,6		2	3,3
	3	7,1		3	3,2		3	6,7		3	2,8
	4	7,1		4	3,0		4	6,8		4	3,1
	5	6,5		5	3,5		5	6,7		5	2,3

Для своего варианта составьте СЛАУ для определения коэффициентов кубического сплайна. СЛАУ представьте в виде двух матриц A(16,16) и B(16,1). Матричное уравнение решите с помощью пакета MathCad (процедура) lsolve(A,*B*), Оцените погрешность решения вычислив число обусловленности матрицы cond(A) с помощью того же пакета. Расчет интерполирующих функций провести с шагом 0,25. Построить графики. Составить отчет

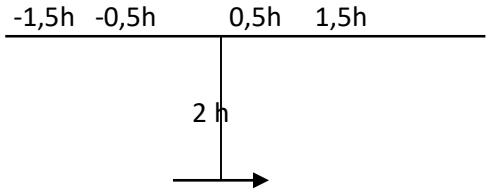
Практическое занятие № 3 АНАЛИТИЧЕСКАЯ АППРОКСИМАЦИЯ ЕСТЕСТВЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ (4 часа)

	h	Dx	1 мВ	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.5	1	-20	0	20	45	80	115	160	200	219	175
2	1	2	35	60	72	100	125	170	210	210	210	160
3	2	4	-4	-2	0	5	10	15	25	25	30	37
4	1	1	15	30	41	40	27	15	5	0	-2	-3
5	1	2	-2	-6	-10	-13	-14	-4	6	18	20	18
6	1	4	-6	-10	-12	-14	-6	0	10	18	19	18
7	2	1	4.25	4.5	4.7	4.9	5.25	5.3	5.2	4.6	3.8	3
8	1	2	3	3	3	4.1	0	-3	-5	-12	-18	-20
9	0.5	4	10	20	42	39	25	-5	-40	-70	-80	-110
10	0.2	1	-170	-175	-170	-150	-125	-110	-95	-70	-30	-5
11	0.4	2	25	21	15	8	0	-8	-15	-17	-12	-8
12	2	4	0	2	13	5	7	10	0	0	1	1
13	2	1	10	20	30	42	55	70	90	105	107	103
14	1	2	0	2	4	6	10	20	20	12	-1	4
15	2	4	175	150	115	50	20	22	20	30	25	40
16	0.5	1	-2	-10	-20	-27	-40	-60	-80	-80	-30	5
17	0.4	2	-100	-180	-200	-350	-400	-600	-900	-600	-250	-100
18	0.5	4	30	130	120	60	0	-40	-120	-200	-130	-85
19	2	5	118	40	-45	-120	-170	-130	-80	40	120	110
20	0.5	2	100	102	101	0	-150	-400	-350	-100	-85	-40

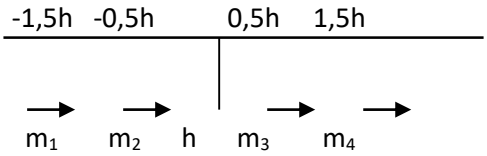
Пример выполнения работы.

«Аналитические модели поля»

Исходная модель:



Проверяемая модель:



Расчетные формулы:

$$Z_в = 100M\frac{2h^2 - x^2}{(h^2 + x^2)^{\frac{5}{2}}} \qquad Z_г = -300M\frac{hx}{(h^2 + x^2)^{\frac{5}{2}}}$$

Рассчитанная матрица:

$$A := \begin{pmatrix} 0 & 0.1768 & 0.0179 & 0.003 \\ -0.1768 & 0 & 0.1768 & 0.0179 \\ -0.0179 & -0.1768 & 0 & 0.1768 \\ -0.003 & -0.0179 & -0.1768 & 0 \end{pmatrix} \qquad B := \begin{pmatrix} 0.0307 \\ 0.0269 \\ -0.0269 \\ -0.0307 \end{pmatrix}$$

$$\mathrm{lsolve}(A,B) = \begin{pmatrix} 6.048\times 10^{-3} \\ 0.158 \\ 0.158 \\ 6.048\times 10^{-3} \end{pmatrix}$$

Решение:

$m_1/M = 6{,}048*10^{-3}$

$m_2/M = 0{,}158$

$m_3/M = 0{,}158$

$m_4/M = 6{,}048*10^{-3}$

Рассчитываем число обусловленности:

$\mathrm{cond1}(A) = 4.386$

$\mathrm{cond2}(A) = 2.619$

$\mathrm{conde}(A) = 6.001$

$\mathrm{condi}(A) = 4.386$

По значению conde (A) = 6.001 <10 можно сделать вывод, что решение устойчиво, качество аппроксимации высокое.

Практическое занятие № 4 ПОДСЧЕТ РЕСУРСОВ ПО ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Каждый студент получает план изоаномал силы тяжести (рис. 1). Необходимо оценить запасы месторождения.

1Разбить аномальную зону на прямоугольники, в пределах которых силу тяжести можно принять постоянной величине (среднему по площади).

2 Определить среднее значение силы тяжести в каждом прямоугольнике.

3Принять избыточную плотность 1,4 г/см^3 и вычислить ресурсы предполагаемого месторождения меди:

$$Z_в = 100M \frac{2h^2 - x^2}{(h^2 + x^2)^{\frac{5}{2}}}$$

$$M = 1400 * \frac{4{,}80}{1{,}4} 6{,}28 * (6{,}67 * 10^{-11})^{-1} * 10^{-5} \sum \Delta S * \Delta g \ \text{(кг)}$$

$M = M_1 * 10^{-9}$ млн. т руды

$M = M * C_{CU}$

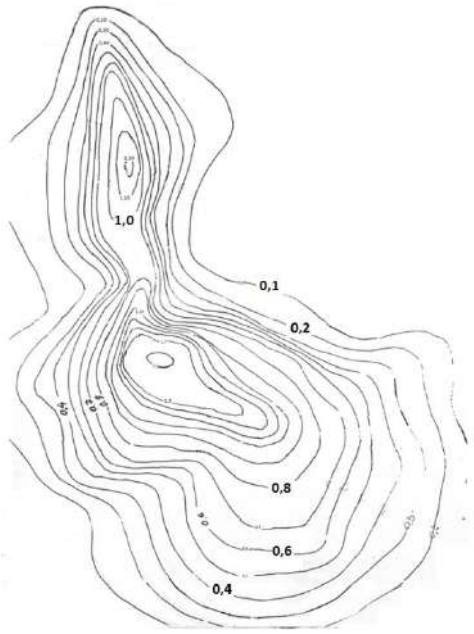


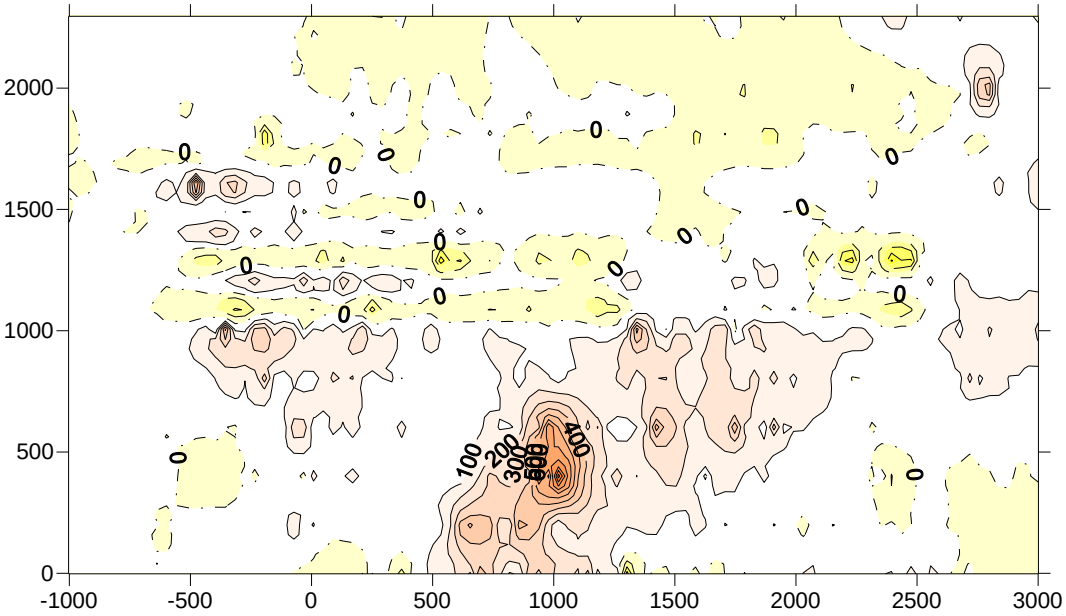
Рис. 1 План изоаномал медноколчеданного месторождения. Избыточная плотность 1,4 г/см^3

Практическое занятие № 5 ВЫДЕЛЕНИЕ РАЗЛОМОВ ПО КОМПЛЕКСУ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

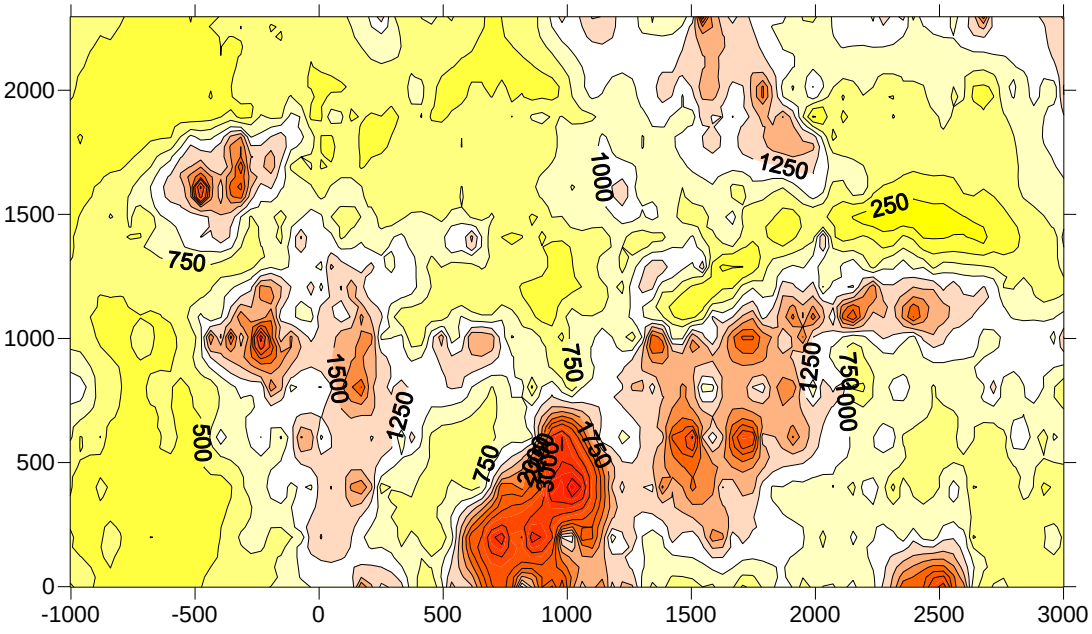
Разломы линейные геологические тела, размеры которых по простиранию во много раз больше чем в крест простиранию. Их выделение на картах полей качественно проводят выделением линеаментов . Для надежного выделения разломов используют несколько геофизических полей.

Разломы выделяют по признакам:

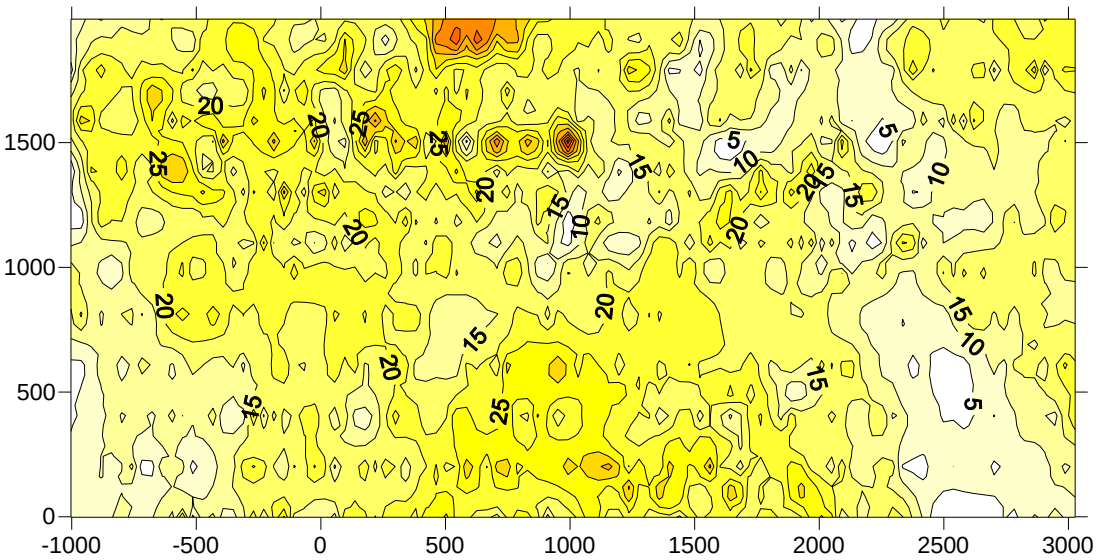
1. Линейные цепочки аномалий.
2. Аномалии типа ступени.
3. Смещение изолиний вдоль некоторой линии.
4. Изменение морфологии аномалий вдоль некоторой прямой.



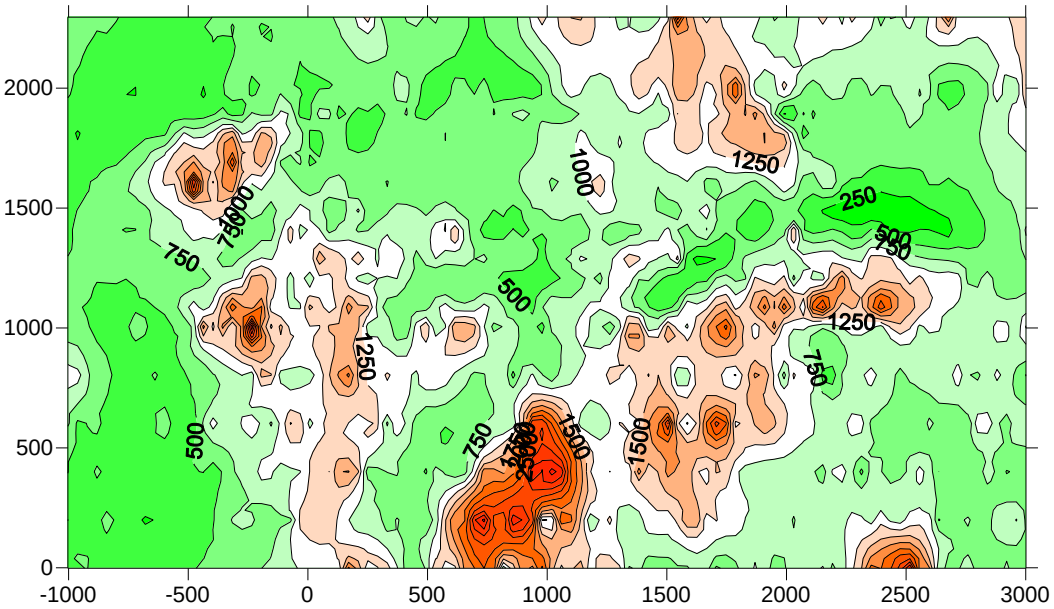
RO2-RO1



Кажущееся сопротивление



МАГНИТНОЕ ПОЛЕ



RO2

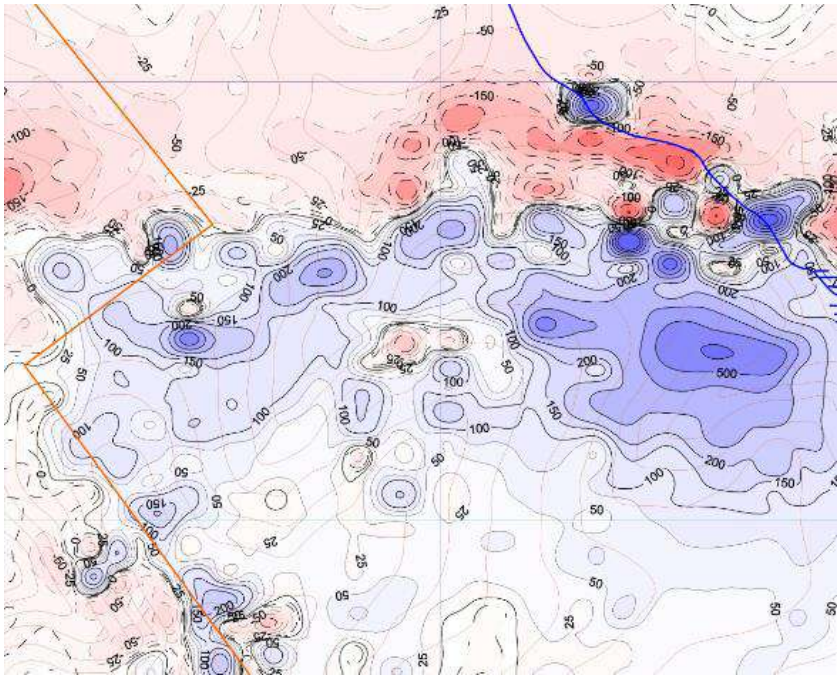
Рис. 1 Пример задания

Практическое занятие № 6 Качеств интерпретация

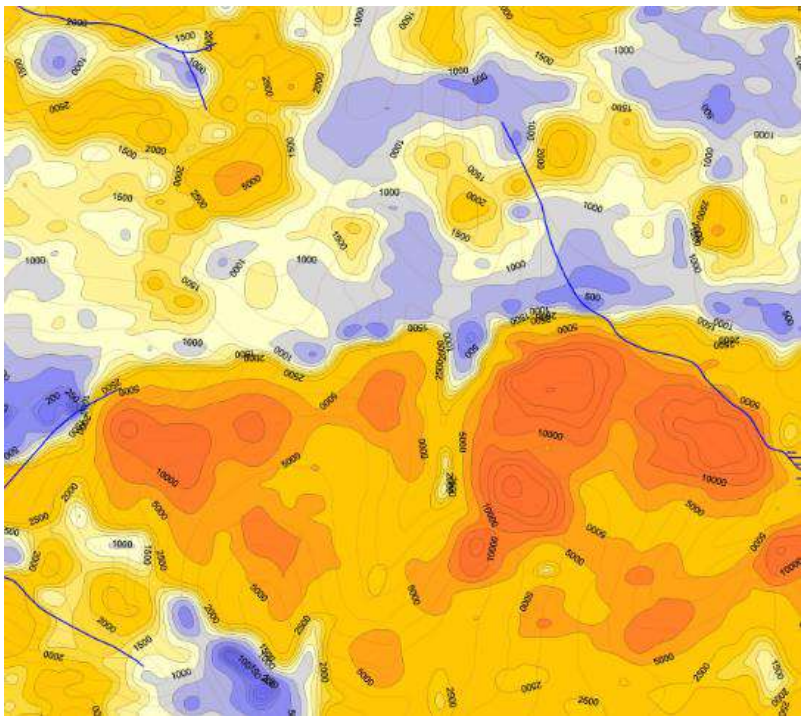
Принципы качественной интерпретации:

Форма аномалии в плане отражает форму тела. Простирание аномалии совпадает с простиранием объекта.

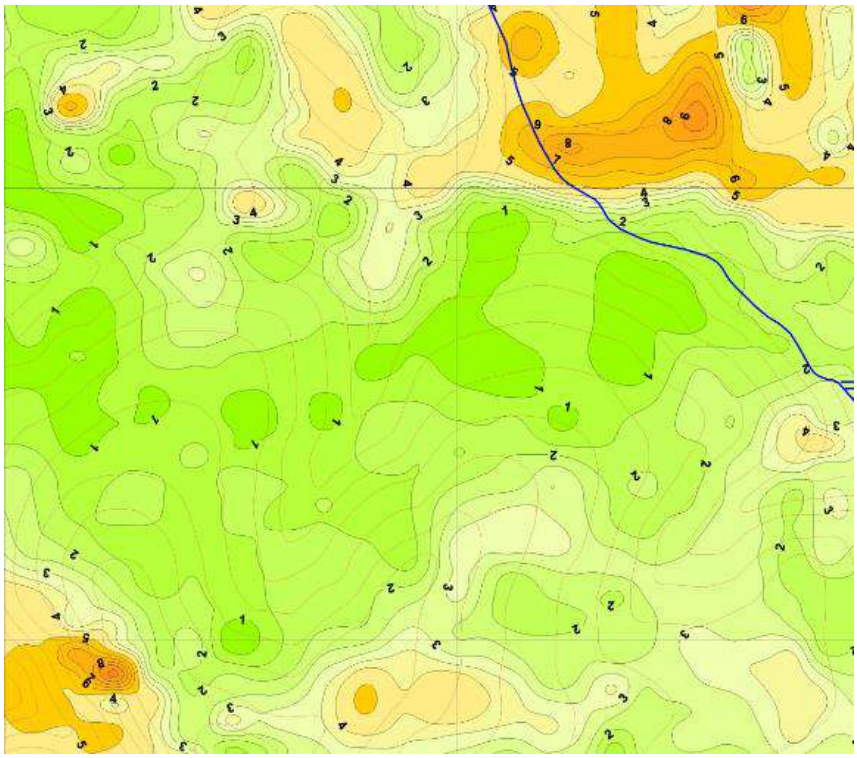
ВАРИАНТ 1



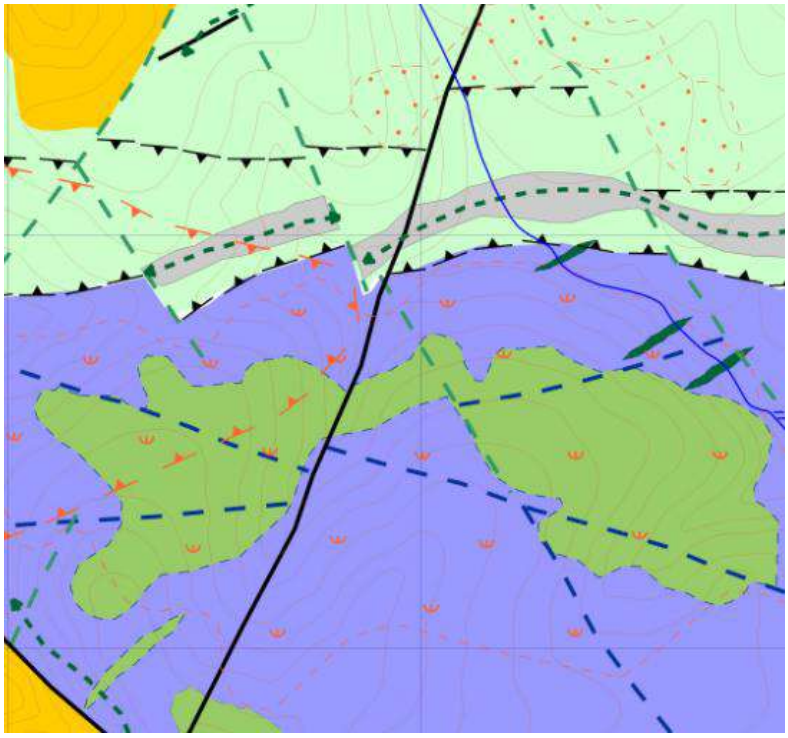
T



КАЖ. СОПР.



ФАЗОВЫЙ УГОЛ (ВП)

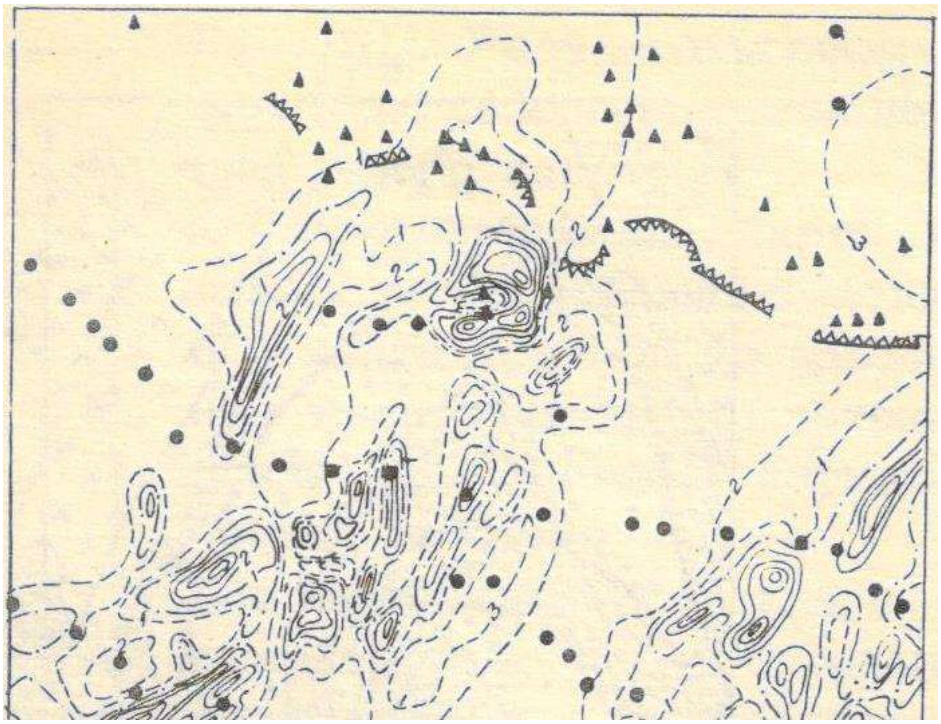


ВАРИАНТ 2

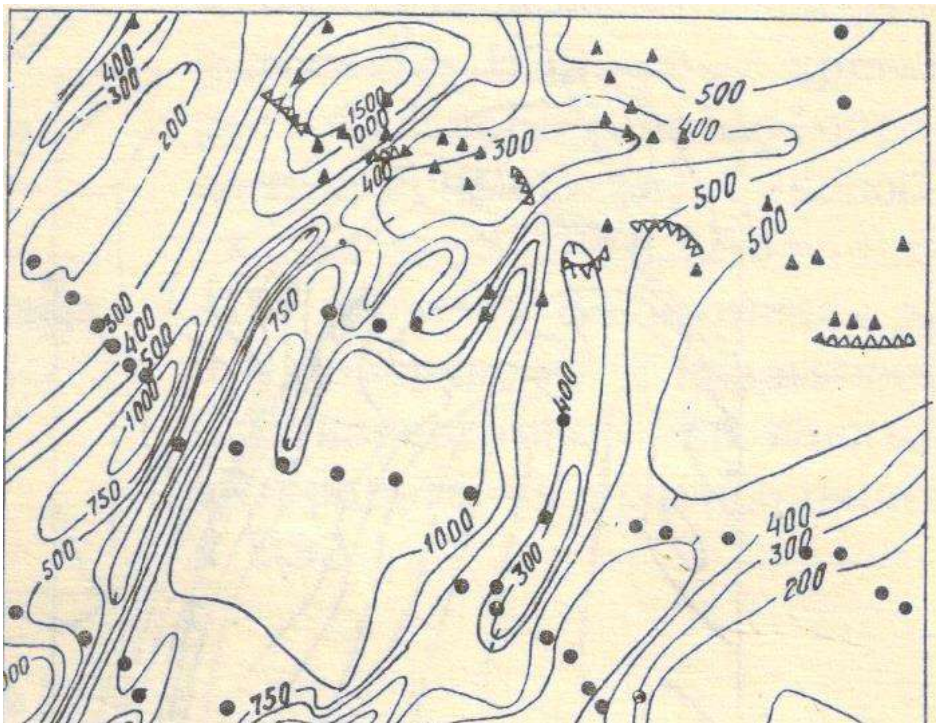
ВЫДЕЛИТЕ ОБЛАСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОРФИРИТОВ АНДЕЗИТОВ СОСТАВА,

ИЗВЕСТНЯКОВ, ПЕСЧАНИКОВ, ТЕКТОНИЧЕСКИЕ НАРУШЕНИЯ.

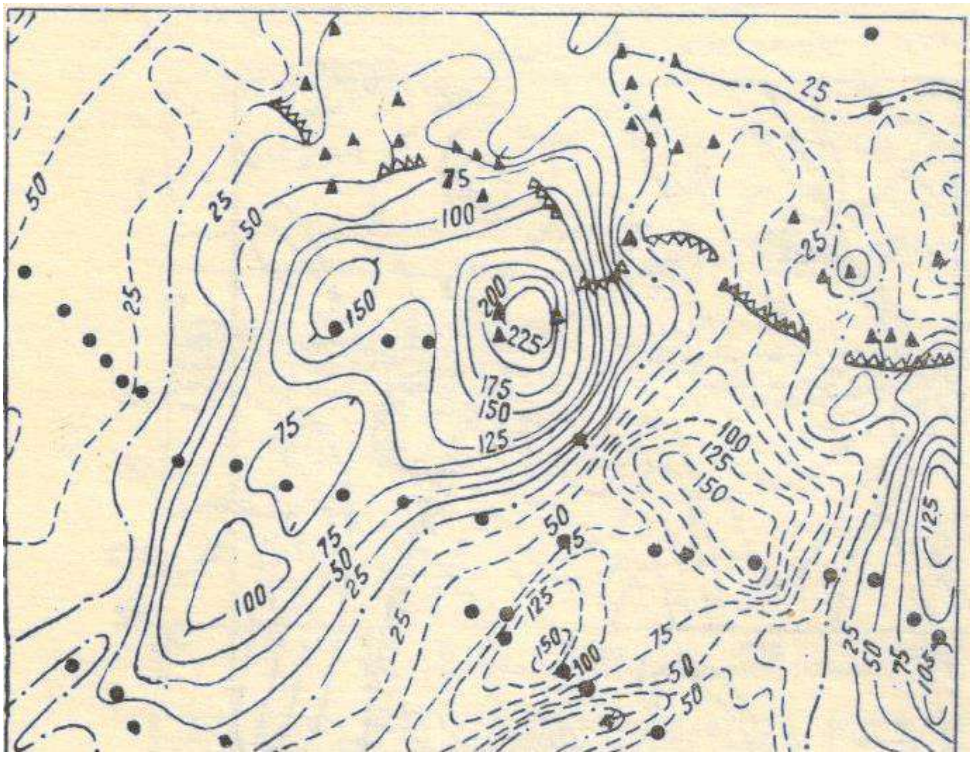
НА КАРТАХ ПОКАЗАНЫ СКВАЖИНЫ И ВЫХОДЫ КОРЕННЫХ ПОРОДАХ



ПЛАН ИЗОДИНАМ



ПЛАН ИЗООМ



ГРАВИТАЦИОННОЕ ПОЛЕ

Практическое занятие № 6 КОРРЕЛЯЦИЯ СОДЕРЖАНИЙ ЖЕЛЕЗА И МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТЬЮ

Оцените тесноту линейной взаимосвязи содержания железа в железных рудах Гусевогорского месторождения и их магнитной восприимчивостью.

Коэффициент корреляции, определяемый по выборочным данным, называется **выборочным коэффициентом корреляции.** Он вычисляется по формуле:

$$r = r_{x;y} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y} = \frac{\overline{x \cdot y} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\sigma_x \cdot \sigma_y}$$

Таблица 1

При оценке тесноты связи можно использовать следующую условную таблицу:

Теснота связи	Величина коэффициента корреляции при наличии	
	прямой связи (+)	обратной связи (−)
Связь отсутствует	$r = 0$	$r = 0$
Связь слабая	$0 < r \le 0{,}3$	$-0{,}3 \le r < 0$
Связь умеренная	$0{,}3 < r \le 0{,}7$	$-0{,}7 \le r < -0{,}3$
Связь сильная	$0{,}7 < r < 1$	$-1 < r < -0{,}7$
Полная функциональная	$r = 1$	$r = -1$

Постройте 3 поля корреляции содержаний железа и магнитной восприимчивости. Определите, с какой величиной теснее связана магнитная восприимчивость. Для последней вычислите коэффициент корреляции и в соответствии с таблицей, приведенной выше, сделайте вывод. В отчете приведите графики и результат расчета. Сформулируйте вывод по выполненной работе.

Таблица 2. Содержание железа в руде по скважинам и их магнитная восприимчивость

№ скв	Значения КАРЬЕР-2	Хим. анализ Fe общ.	Хим. анализ Fe маг.	Fe sil	Магнитная восприимчивость
ВАРИАНТ 1					
258	5254	18,2	12,03	6,17	0,007361
245	5249	18,26	12,09	6,17	0,007438
223	5358	15,53	8,96	6,57	0,005791
198	5274	15,58	10,12	5,46	0,007054
165	5261	16,81	10,55	6,26	0,007253
118	5389	12,75	6,53	6,22	0,005334

102	5387	14,9	8,11	6,79	0,005364
44	5495	12,16	5,2	6,96	0,003813
30	5515	11,84	4,76	7,08	0,003533
13	5653	9,23	3,06	6,17	0,001651
108	5426	12,82	6,31	6,51	0,004797
133	5386	14,45	7,77	6,68	0,005378
251	5197	17,32	11,39	5,93	0,008248
241	5174	17,22	12,27	4,95	0,008612
221	5189	16,89	12,12	4,77	0,008374
211	5225	15,88	8,93	6,95	0,007810
117	5167	19,22	14,05	5,17	0,008723
106	5210	17,35	12,4	4,95	0,008044
96	5210	16,8	10,34	6,46	0,008044
86	5243	15,77	9,86	5,91	0,007531
298	5181	15,91	11,23	4,68	0,008501
271	5159	17,46	11,96	5,5	0,008850
206	5277	17,02	10,88	6,14	0,007008
176	5771	5,06	1,92	3,14	0,000114
151	5240	16,46	9,84	6,62	0,007577
ВАРИАНТ 2					
142	5247	15,99	9,83	6,16	0,007469
175	5285	17,48	10,15	7,33	0,006886
222	5424	13,62	7,06	6,56	0,004826
235	5201	16,38	10,13	6,25	0,008185
68	5211	17,49	12,38	5,11	0,008028
78	5214	17,86	12,33	5,53	0,007981
93	5297	14,21	8,76	5,45	0,006704
128	5618	9,28	4,44	4,84	0,002120
154	5248	15,24	8,41	6,83	0,007453
124	5785	5,21	1,42	3,79	-6,3551E-05
87	5336	14,13	7,7	6,43	0,006118
74	5302	16,83	10,24	6,59	0,006629
47	5305	17,95	10,96	6,99	0,006583
34	5417	14,67	8,8	5,87	0,004927
117	5402	14,71	8,39	6,32	0,005145
138	5261	14,84	8,49	6,35	0,007253
147	5264	15,85	9,82	6,03	0,007207
157	5281	16,45	10,27	6,18	0,006947
149	5253	16,56	10,86	5,7	0,007376
136	5278	16,12	10,58	5,54	0,006993

100	5341	15,28	9,54	5,74	0,006043
84	5291	15,92	10,78	5,14	0,006795
94	5456	13,19	7,23	5,96	0,004366
105	5341	14,96	8,38	6,58	0,006043
ВАРИАНТ 3					
85	5237	17,8	12,61	5,19	0,007623
269	5277	15,16	8,26	6,9	0,007008
262	5321	15,5	8,71	6,79	0,006342
212	5303	17	9,76	7,24	0,006613
189	5308	18,46	11,97	6,49	0,006538
162	5248	17,6	11,78	5,82	0,007453
152	5269	17,86	12,44	5,42	0,007131
139	5301	16,22	9,82	6,4	0,006644
168	5190	19,48	14,17	5,31	0,008358
198	5222	17,83	10,83	7	0,00785703
208	5321	16,61	9,79	6,82	0,006342793
223	5265	18,18	11,44	6,74	0,007192336
258	5272	18,23	12,38	5,85	0,007085156
263	5357	14,65	8,03	6,62	0,005806037
278	5248	17,23	11,49	5,74	0,00745382
100	5316	17,98	9,73	8,25	0,006417917
120	5299	17,55	9,65	7,9	0,0066744
132	5361	17,04	9,16	7,88	0,005746843
142	5448	15,31	8,34	6,97	0,004480867
147	5256	17,56	10,83	6,73	0,007330558
161	5335	16,88	9,9	6,98	0,006133194
174	5291	16,99	10,09	6,9	0,006795669
181	5529	14,02	7,09	6,93	0,003338015
165	5233	17,63	10,89	6,74	0,007685952
153	5276	17,22	9,64	7,58	0,007024038
ВАРИАНТ 4					
143	5273	18,16	11,92	6,24	0,007069868
104	5267	17,07	10,26	6,81	0,007161684
116	5307	18,34	11,57	6,77	0,006553498
126	5471	14,55	6,51	8,04	0,004152913
141	5358	16,68	9,51	7,17	0,00579123
281	5549	10,18	4,27	5,91	0,003060965
267	5527	9,78	3,78	6	0,00336583
253	5381	11,95	6,33	5,62	0,00545219
206	5265	17,95	10,98	6,97	0,007192336
170	5331	14,77	9,27	5,5	0,006192967

167	5316	14,51	8,61	5,9	0,006417917
154	5293	14,74	9,13	5,61	0,006765317
155	5311	14,81	9,88	4,93	0,006493183
163	5338	13,57	8,36	5,21	0,006088423
174	5307	14,94	9,24	5,7	0,006553498
197	5293	16,7	10,34	6,36	0,006765317
207	5292	17,66	12,03	5,63	0,00678049
238	5379	14,74	8,92	5,82	0,005481557
243	5462	12,54	7,16	5,38	0,004280914
252	5316	14,08	8,63	5,45	0,006417917
271	5529	10,81	5,04	5,77	0,003338015
323	5413	13,85	7,85	6	0,004985275
293	5514	13,81	7,92	5,89	0,003547121
272	5569	7,22	3,25	3,97	0,002785905
251	5432	13,08	7,62	5,46	0,004710647
ВАРИАНТ 5					
188	5289	16,75	10,61	6,14	0,006826043
172	5313	14,25	8,82	5,43	0,00646306
164	5279	14,98	8,57	6,41	0,00697826
259	5616	5,9	2,27	3,63	0,002147226
264	5282	13,95	8,01	5,94	0,006932534
301	5497	11,25	5,32	5,93	0,003785487
318	5415	12,66	6,880	5,78	0,004956276
24	5497	11,51	5,18	6,33	0,003785487
36	5495	11,41	5,58	5,83	0,003813627
48	5520	12,22	5,42	6,8	0,003463342
61	5561	10,74	4,29	6,45	0,002895692
84	5559	10,13	4,12	6,01	0,002923188
85	5609	12,02	4,86	7,16	0,00224167
132	5487	12,73	5,87	6,86	0,003926393
181	5557	12,94	6,67	6,27	0,002950703
71	5556	11,43	5,77	5,66	0,002964469
62	5567	11,91	5,78	6,13	0,002813322
59	5553	10,65	5,16	5,49	0,003005794
47	5528	11,13	5,6	5,53	0,00335192
26	5522	10,35	4,89	5,46	0,003435456
35	5536	11,24	5,62	5,62	0,003240819
7	5646	8,52	2,97	5,55	0,001745119
123	5262	14,69	10,15	4,54	0,007238357
113	5229	15,86	11,72	4,14	0,007748079
ВАРИАНТ 6					

99	5216	14,25	8,69	5,56	0,00795065
66	5226	16,7	12	4,7	0,007794737
49	5327	14,95	10,21	4,74	0,00625283
104	5230	16,13	11,26	4,87	0,007732539
115	5228	14,13	9,65	4,48	0,007763626
96	5222	15,53	11,18	4,35	0,00785703
45	5293	15,57	10,95	4,62	0,006765317
260	5207	14,33	8,07	6,26	0,008091483
245	5684	8,23	2,28	5,95	0,001241876
239	5441	15,6	9,88	5,72	0,00458123
226	5504	10,75	4,94	5,81	0,003687158
206	5550	11,87	5,81	6,06	0,003047165
205	5695	9,17	3,63	5,54	0,001097454
195	5730	7,61	1,66	5,95	0,000641618
187	5724	7,42	1,71	5,71	0,000719365
179	5604	12,68	6,03	6,65	0,002309275
171	5650	13,21	8,48	4,73	0,001691827
163	5499	10,97	5,02	5,95	0,003757368
142	5718	6,54	1,16	5,38	0,000797276
139	5757	5,68	0,82	4,86	0,00029376
59	5617	12,75	4,37	8,38	0,002133754
69	5680	11,97	3,98	7,99	0,001294532
79	5519	14,17	6,32	7,85	0,003477292
120	5238	16,43	12,04	4,39	0,007608427
202	5246	17,27	11,2	6,07	0,007484694
229	5295	16,75	11,22	5,53	0,006734989
ВАРИАНТ 7					
302	5210	17,19	11,82	5,37	0,008044485
341	5242	17,67	12,3	5,37	0,007546513
393	5281	16,18	11,11	5,07	0,006947771
423	5177	18,41	11,81	6,6	0,008564465
405	5252	17,25	11,03	6,22	0,007392142
380a	5183	18,07	12,44	5,63	0,008469431
360	5258	16,35	11,07	5,28	0,007299801
350a	5322	16,55	9,57	6,98	0,006327785
320a	5261	17,59	11,72	5,87	0,007253709
231a	5349	16,8	9,66	7,14	0,005924692
151	5445	14,7	6,84	7,86	0,004523848
31	5378	15,08	7,11	7,97	0,005496248
379	5179	16,92	12,53	4,39	0,008532762
354	5256	17,1	11,02	6,08	0,007330558
344	5370	15,72	9,86	5,86	0,005613977

329	5275	16,35	10,6	5,75	0,007039309
279	5258	16,28	11,54	4,74	0,007299801
248	5229	17,75	12,29	5,46	0,007748079
222	5285	15,51	10,61	4,9	0,006886861
127	5185	16,84	12,53	4,31	0,008437801
97	5329	13,88	8,4	5,48	0,006222887
67	5615	12,65	4,18	8,47	0,002160704
37	5318	15,44	9,26	6,18	0,00638785
7	5575	12,23	3,97	8,26	0,002703772
410	5185	18,23	12,92	5,31	0,008437801
ВАРИАНТ 8					
400	5145	18,66	13,12	5,54	0,009075059
358	5268	15,98	10,22	5,76	0,007146367
348	5327	17,4	11,59	5,81	0,00625283
328	5274	16,59	10,65	5,94	0,007054585
254	5278	16,24	10,68	5,56	0,006993514
206	5237	16,13	9,7	6,43	0,00762392
166	5427	14,96	8,46	6,5	0,004782731
163	5478	16,16	9,64	6,52	0,004053648
146	5510	12,41	5,41	7	0,003603075
433	5173	17,44	12,26	5,18	0,008627944
444	5211	17,1	11,96	5,14	0,00802883
454	5198	18,02	12,18	5,84	0,008232804
475	5178	15,43	9,77	5,66	0,008548611
506	5317	16,49	9,93	6,56	0,006402881
497	5235	16,18	10,48	5,7	0,007654924
443	5216	16,6	11,09	5,51	0,00795065
485	5135	16,69	12,38	4,31	0,009235924
436	5232	16,57	11,07	5,5	0,007701475
448	5263	17,98	12,22	5,76	0,007223011
529	5280	15,69	10,39	5,3	0,006963012
528	5241	15,58	10,47	5,11	0,007561983
522	5341	15,29	10,28	5,01	0,006043702
514	5223	18,04	12,59	5,45	0,007841448
250	5230	15,15	11,38	3,77	0,007732539
ВАРИАНТ 9					
219	5367	12,61	8	4,61	0,005658216
214	5325	13,98	9,54	4,44	0,006282795
159	5343	13,13	8,61	4,52	0,006013916
144	5399	14,21	9,67	4,54	0,005188869
338	5286	15,1	10,25	4,85	0,006871648

348	5244	14,66	8,68	5,98	0,007515592
277	5219	18,6	12,45	6,15	0,007903813
297	5378	14,64	6,96	7,68	0,005496248
339	5255	13,74	8,93	4,81	0,007345945
218	5466	11,81	7,31	4,5	0,004223973
205	5741	7,32	4,16	3,16	0,000499503
195	5401	14,14	9,62	4,52	0,00515972
175	5387	12,86	8,44	4,42	0,005364221
148	5379	18,05	13,81	4,24	0,005481557
138	5391	11,81	7,37	4,44	0,005305684
12	5123	15,99	11,9	4,09	0,009429792
32	5120	20,62	16,66	3,96	0,009478401
25	5115	17,03	13,75	3,28	0,009559542
19	5139	18,43	15,19	3,24	0,009171503
18	5162	19,64	15,57	4,07	0,008803018
24	5127	19,85	16,28	3,57	0,009365068
243	5444	11,89	7,7	4,19	0,004538186
226	5370	12,11	8,93	3,18	0,005613977
155	5179	14,65	11	3,65	0,008532762
85	5379	15,24	10,21	5,03	0,005481557
ВАРИАНТ 10					
74	5313	14,26	9,62	4,64	0,00646
18	5267	14,60	10,68	3,92	0,00716
65	5266	14,60	10,57	4,03	0,00717
82	5307	13,75	9,30	4,45	0,00655
87	5359	13,16	8,97	4,19	0,00577
89	5400	13,21	9,05	4,16	0,005174292
95	5323	15,28	10,98	4,3	0,006312782
99	5310	15,52	11,12	4,4	0,006508253
101	5269	14,78	10,93	3,85	0,007131055
110	5266	14,7	10,78	3,92	0,007177007
130	5217	15,26	11,71	3,55	0,007935031
132	5229	15,58	11,77	3,81	0,007748079
281	5337	14,15	9,48	4,67	0,006103341
284	5294	13,93	9,55	4,38	0,00675015
285	5438	11,10	6,82	4,28	0,004624321
289	5282	14,90	10,59	4,31	0,006932534
303	5361	13,52	9,44	4,08	0,005746843
304	5347	13,05	8,83	4,22	0,005954411
307	5301	13,14	9,39	3,75	0,00664414
309	5368	12,22	8,31	3,91	0,005643465
310	5348	12,89	9,08	3,81	0,005939549

319	5338	14,66	10,82	3,84	0,006088423
322	5327	14,07	10,35	3,72	0,00625283
325	5332	13,11	8,98	4,13	0,006178015
328	5409	11,15	7,26	3,89	0,005043337
ВАРИАНТ 11					
329	5365	13,15	9,07	4,08	0,005687736
340	5431	12,35	8,41	3,94	0,004725053
344	5400	14,16	10,14	4,02	0,005174292
347	5463	10,98	7,22	3,76	0,004266671
348	5476	12,32	8,42	3,9	0,004081983
353	5411	10,94	7,26	3,68	0,005014295
364	5365	13,20	9,11	4,09	0,005687736
369	5360	12,86	9,80	3,06	0,005761633
381	5430	10,13	6,67	3,46	0,004739465
383	5269	16,69	12,52	4,17	0,007131055
391	5256	15,20	11,12	4,08	0,007330558
27	5311	14,77	10,73	4,04	0,006493183
51	5476	10,53	6,38	4,15	0,004081983
75	5341	13,72	10,23	3,49	0,006043702
140	5500	8,32	3,91	4,41	0,003743316
170	5321	14,00	10,23	3,77	0,006342793
190	5526	8,82	5,35	3,47	0,003379745
203	5412	11,49	7,73	3,76	0,004999783
240	5332	14,21	10,16	4,05	0,006178015
253	5245	14,89	11,31	3,58	0,00750014
234	5397	15,29	8,93	6,36	0,005218041
243	5385	14,49	7,97	6,52	0,005393522
265	5415	14,95	9,51	5,44	0,004956276
266	5355	14,31	9,36	4,95	0,005835668
276	5257	17,46	11,87	5,59	0,007315176
286	5357	16,01	10	6,01	0,005806037
ВАРИАНТ 12					
287	5358	15,38	9,55	5,83	0,00579123
306	5224	20,34	14,08	6,26	0,007825872
285	5287	16,52	11,68	4,84	0,00685644
268	5458	14,91	8,71	6,2	0,004337939
264	5326	15,79	11,16	4,63	0,006267809
255	5427	14,67	8,38	6,29	0,004782731
232	5333	16,01	9,95	6,06	0,006163069
212	5360	16,24	9,72	6,52	0,005761633
73	5338	14,21	9,68	4,53	0,006088423

76	5304	14,58	10,15	4,43	0,006598793
83	5314	14,42	9,62	4,8	0,006448006
123	5419	13,05	8,69	4,36	0,004898342
153	5743	7,41	3,32	4,09	0,000473722
166	5322	15,05	9,8	5,25	0,006327785
239	5584	9,91	5,51	4,4	0,002580903
229	5537	11,6	6,58	5,02	0,003226954
207	5539	11,3	6,29	5,01	0,00319924
199	5482	11,38	6,47	4,91	0,003997038
190	5554	11,18	5,92	5,26	0,002992014
137	5689	9,35	4,52	4,83	0,00117616
107	5505	9,64	4,53	5,11	0,003673131
106	5586	11,17	6,68	4,49	0,002553653
121	5684	7,39	2,78	4,61	0,001241876
151	5663	10,31	5,57	4,74	0,001519149
272	5206	18,94	14,99	3,95	0,008107161
252	5262	15,91	11,59	4,32	0,007238357
212	5239	15,5	11,79	3,71	0,00759294
192	5205	16,72	13,12	3,6	0,008122846
182	5167	16,11	12,31	3,8	0,008723346
211	5228	15,77	11,8	3,97	0,007763626
220	5244	16,08	11,76	4,32	0,007515592
190	5200	15,62	11,75	3,87	0,008201357
245	5233	17	12,55	4,45	0,007685952
235	5276	15,85	11,62	4,23	0,007024038
Вариант 13					
224	5254	16,56	12,9	3,66	0,007361338
205	5166	17,4	14,2	3,2	0,008739268
185	5202	16,35	12,37	3,98	0,008169935
203	5222	16,45	11,44	5,01	0,00785703
233	5196	16,22	12,5	3,72	0,008264276
156	5176	15,86	12,15	3,71	0,008580325
172	5203	16,49	12,44	4,05	0,008154232
154	5213	16,61	13,15	3,46	0,00799754
37	5255	14,51	10,34	4,17	0,007345945
36	5225	15,94	12,16	3,78	0,007810301
16	5268	15,1	10,43	4,67	0,007146367
300	5360	14,9	9,97	4,93	0,005761633
125	5656	9,06	4,48	4,58	0,001612031
73	5274	14,64	10,65	3,99	0,007054585
55	5487	10,74	6,59	4,15	0,003926393
79	5337	14,67	10,82	3,85	0,006103341

91	5277	16,21	12,2	4,01	0,007008773
164	5430	12,34	7,88	4,46	0,004739465
18	5267	14,60	10,68	3,92	0,007161684
89	5400	13,21	9,05	4,16	0,005174292
99	5310	15,52	11,12	4,4	0,006508253
130	5217	15,26	11,71	3,55	0,007935031
110	5266	14,7	10,78	3,92	0,007177007
87	5359	13,16	8,97	4,19	0,005776429
101	5269	14,78	10,93	3,85	0,007131055
132	5229	15,58	11,77	3,81	0,007748079
95	5323	15,28	10,98	4,3	0,006312782
ВАРИАНТ 14					
289	5282	14,90	10,59	4,31	0,006932
303	5361	13,52	9,44	4,08	0,005746
307	5301	13,14	9,39	3,75	0,00664
348	5476	12,32	8,42	3,9	0,00408
386	5254	13,45	9,70	3,75	0,007361
369	5360	12,86	9,80	3,06	0,005761
347	5463	10,98	7,22	3,76	0,004266
391	5256	15,20	11,12	4,08	0,007330
344	5400	14,16	10,14	4,02	0,005174
329	5365	13,15	9,07	4,08	0,005687
322	5327	14,07	10,35	3,72	0,00625
265	5356	12,33	8,21	4,12	0,00582
228	5364	14,95	10,53	4,42	0,005702
208	5293	13,43	9,47	3,96	0,006765
188	5451	12,39	7,63	4,76	0,004437
178	5386	13,51	9,19	4,32	0,005378
179	5330	14,57	10,49	4,08	0,006207
204	5342	12,57	8,58	3,99	0,006028
239	5258	13,55	9,46	4,09	0,007299
254	5223	15,13	11,05	4,08	0,007841
279	5563	7,86	4,79	3,07	0,002868
100	5272	16,58	12,59	3,99	0,007085
64	5404	13,72	9,46	4,26	0,005116
41	5481	12,44	7,89	4,55	0,004011
28	5494	10,67	6,43	4,24	0,003827
12	5405	11,97	7,67	4,3	0,005101
7	5402	12,68	8,27	4,41	0,005145

Практическое занятие № 7 ВЫДЕЛЕНИЕ ЗОН МЕТАСОМАТОЗА

ПРЕДСТАВЛЕНЫ КАРТЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ, КАЖУЩЕГОСЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ, КАЖУЩЕЙСЯ ПОЛЯРИЗУЕМОСТИ И МАСШТАБА 1:10000

1 РАССМОТРИТЕ ПРЕДСТАВЛЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

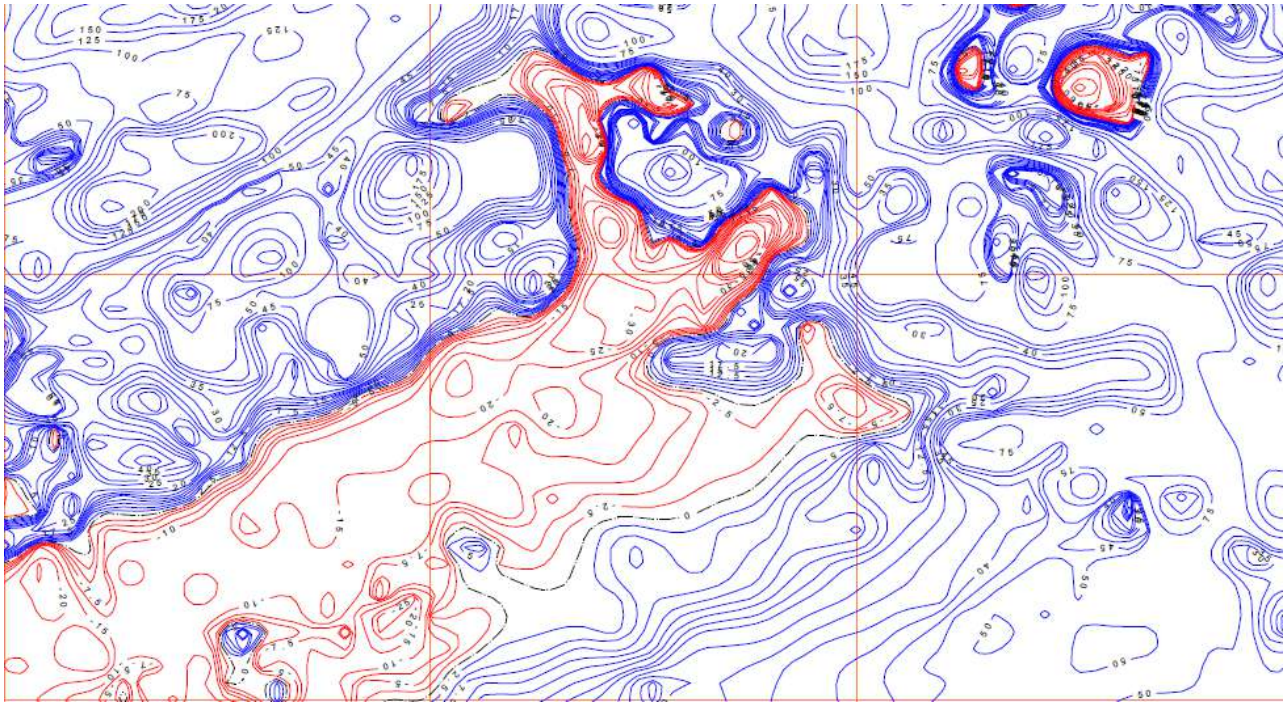
2 СФОРМУЛИРУЙТЕ ПРИЗНАКИ СТРУКТУРНО-ВЕЩЕСТВЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ И СОЗДАЙТЕ ПРИЗНАКОВОЕ ПРОСТРАНСТВО (ДИАПАЗОН ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИЧЕСКОГО ПОЛЯ)

3 ВЫПОЛНИТЕ ПРОЦЕДУРУ ЕСТЕСТВЕННОГО РАССЛОЕНИЯ ДАННЫХ (РАСПОЗНАВАНИЕ ОБРАЗОВ)

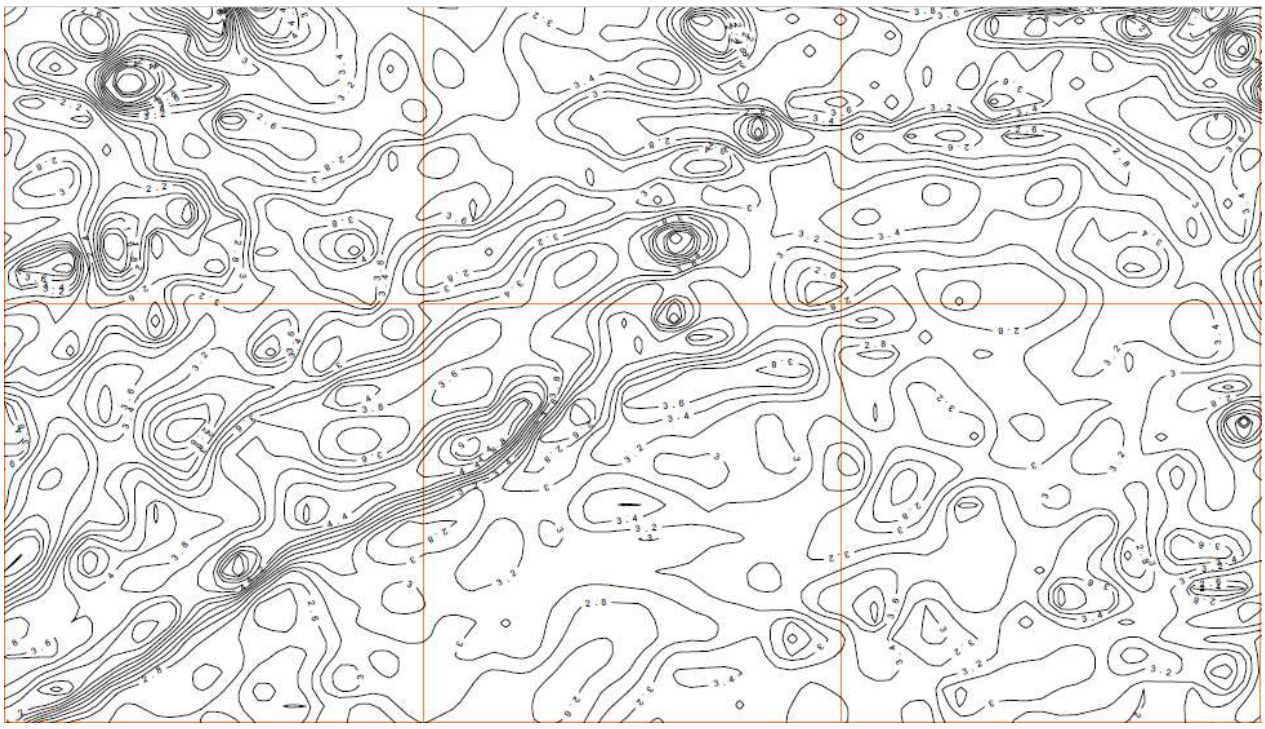
4 ВЫДЕЛИТЕ ЗОНУ МЕТАСОМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ. УКАЖИТЕ МЕСТОПОЛОЖЕНИЕ ТРЕХ СКВАЖИН ГЛУБИНОЙ 100 М

4 НАПИШИТЕ ОТЧЕТ

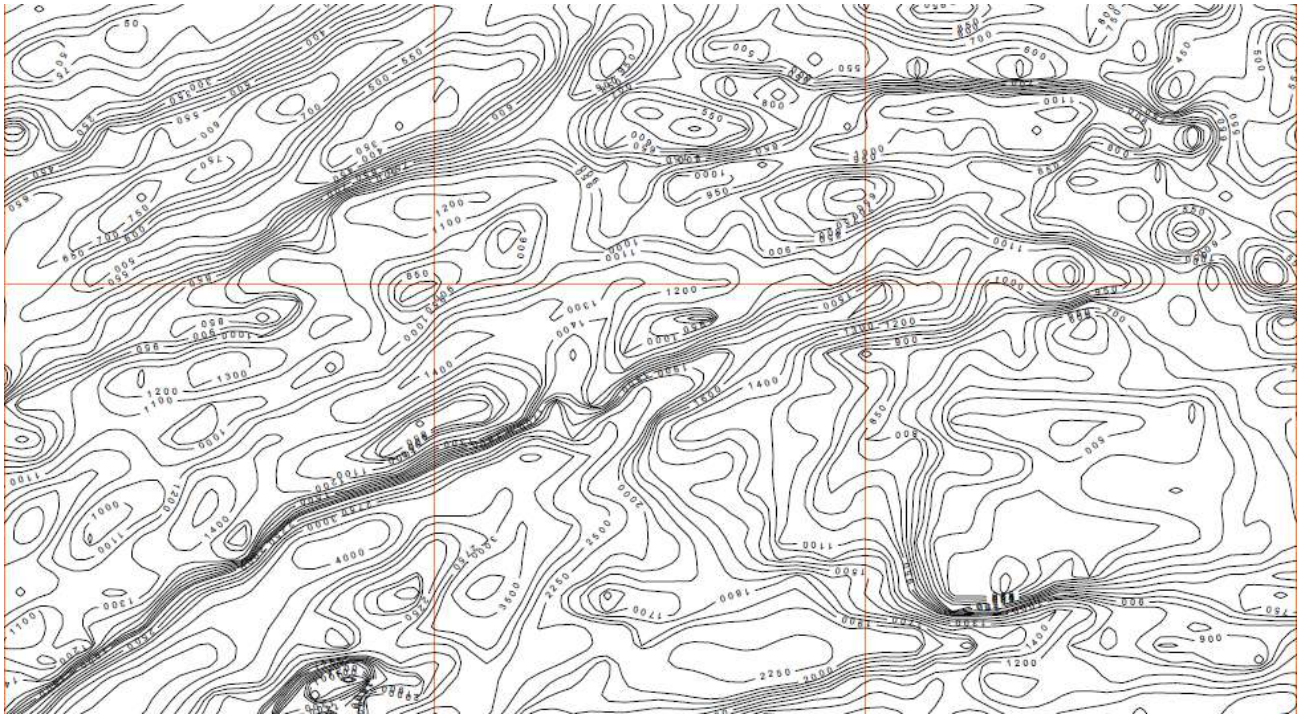
1 вариант



МАГНИТНОЕ ПОЛЕ



ВП FI



КАЖУЩЕЕСЯ СОПРОТИВЛЕНИЕ

2 вариант

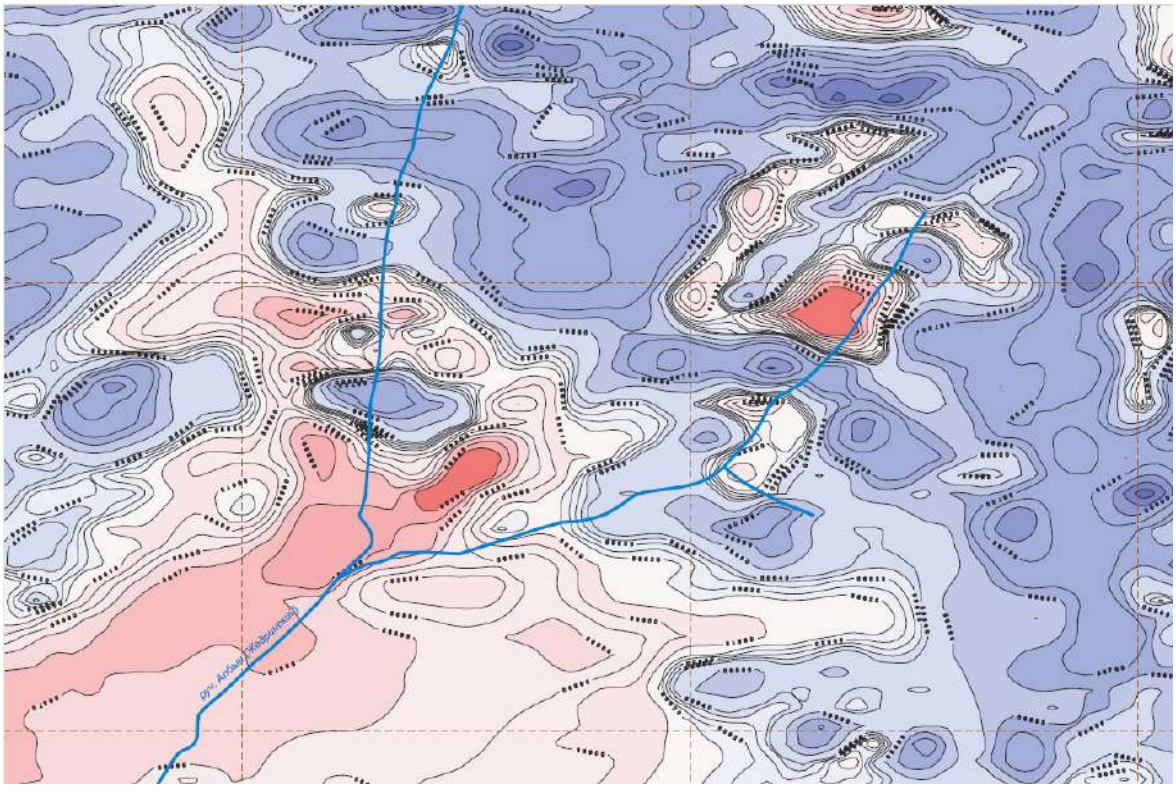
ПРЕДСТАВЛЕНЫ КАРТЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ, КАЖУЩЕГОСЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ, КАЖУЩЕЙСЯ ПОЛЯРИЗУЕМОСТИ И ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА МАСШТАБА :10000

1 РАССМОТРИТЕ ПРЕДСТАВЛЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

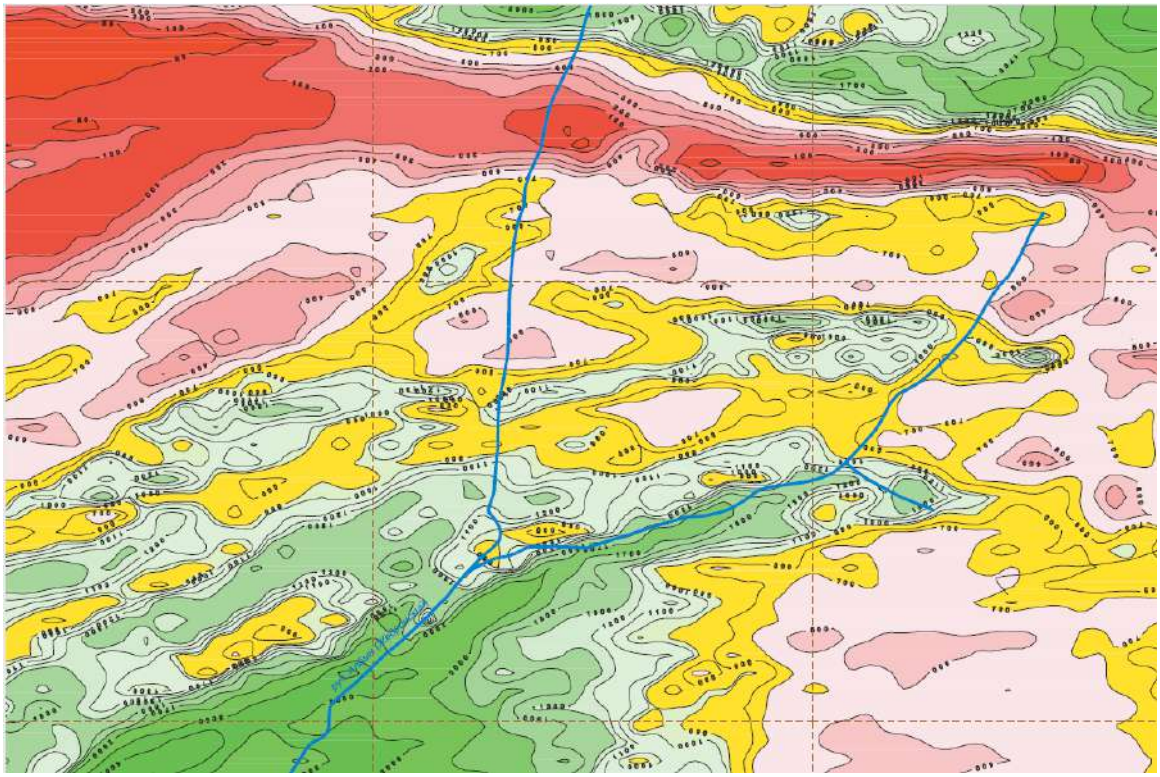
2 ОПРЕДЕЛИТЕ КАК ИСПОЛЬЗОВАНЫ ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО КАРТИРОВАНИЯ

3 ДОПОЛНИТЕ ВЫПОЛНЕННОЕ ИСТОЛКОВАНИЕ ПОЛЕЙ ЭЛЕМЕНТАМИ, НЕ НАШЕДШИМИ ОТРАЖЕНИЯ НА ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ КАРТЕ

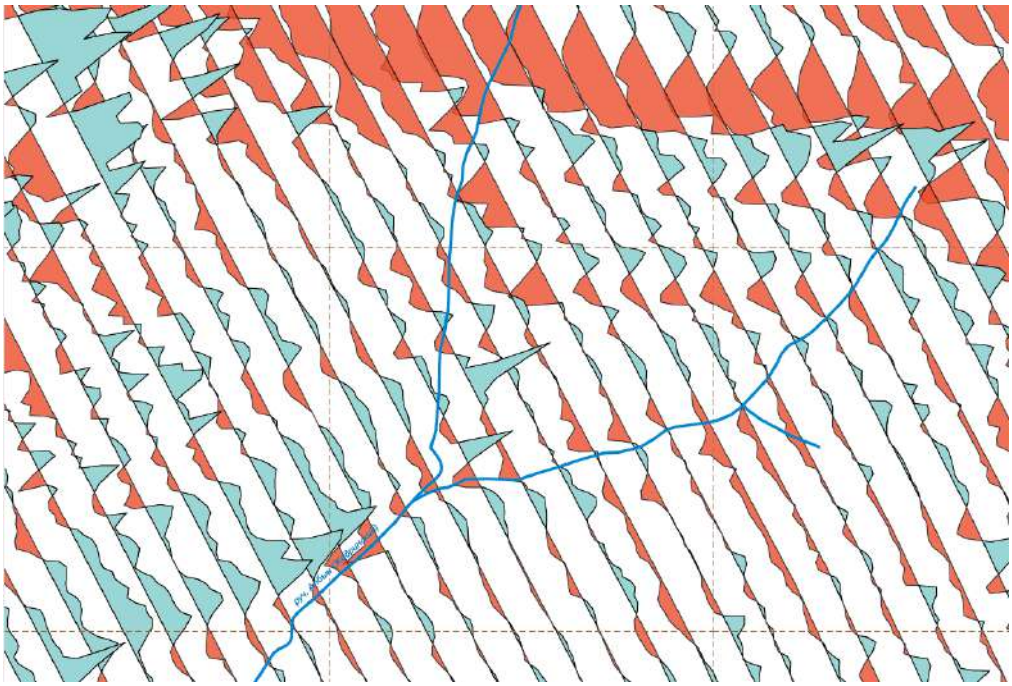
4 НАПИШИТЕ ОТЧЕТ



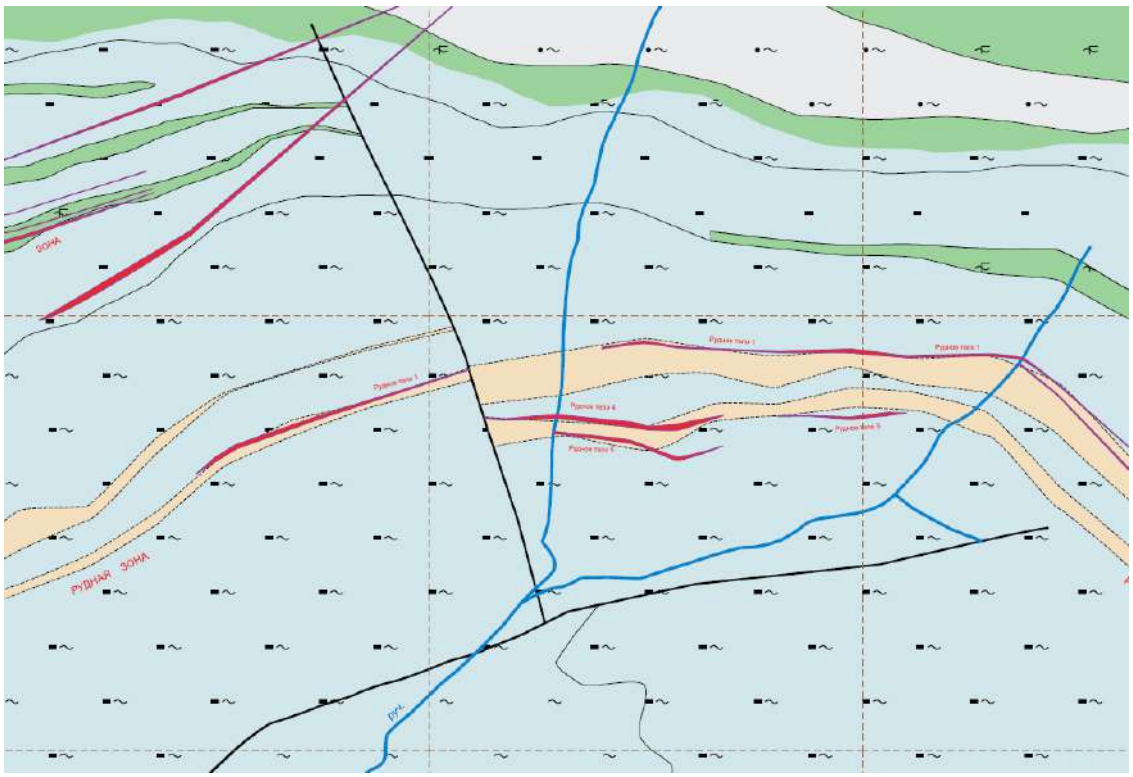
МАГНИТНОЕ ПОЛЕ



КАЖУЩЕЕСЯ СОПРОТИВЛЕНИЕ



ГРАФИКИ КАЖУЩЕЙСЯ ПОЛЯРИЗУЕМОСТИ



Условные обозначения

- низкие слабодифференцированные поля кажущегося сопротивления (500 - 1000 Ом*м), низкие спокойные поля магнитногот поля (50нТл - 100 нТл), отмечающиеся поляризуемостью (1% - 3%) соответствующие метапесчаникам, метаалевролитам с прослоями филлитизированных сланцев

- низкие, линейные поля кажущегося сопротивления (40 - 400 Ом*м), низкие дифференцированные поля магнитногот поля (50нТл - 200 нТл), отмечающиеся дифференцированной поляризуемостью (1% - 4%) соответствующие графитистым (углеродсодержащим) сланцам с прослоями серых филлитизированных алевритовых и карбонат-кремнистых сланцев, филлитовых сланцев верхней подсвиты

- дифференцированные поля кажущегося сопротивления (400 - 1000 Ом*м), низкие знакопеременные дифференцированные поля магнитногот поля (-20нТл - 300 нТл), отмечающиеся слабодифференцированной поляризуемостью (2,5% - 3,5%) соответствующие участкам переслаивания графитистых (углеродсодержащих) сланцев и серых алевритовых филлитизированных сланцев с карбонат-глинистыми (карбонат-слюдяно-кварцевыми) углеродистыми и карбонат-кремнистыми сланцами средней подсвиты

- высокие слабодифференцированные поля кажущегося сопротивления (1500 - 5000 Ом*м), низкие знакопеременные поля магнитногот поля (-70нТл - 30 нТл), отмечающиеся высокой слабодифференцированной поляризуемостью (3% - 4%) соответствующие графитистым сланцам с прослоями двуслюдяных сланцев (альбит-слюдяно-кварцевых) нижней подсвиты

- высокие поля кажущегося сопротивления (2000 - 10000 Ом*м), линейные интенсивные аномалии магнитногот поля (500 нТл - 600 нТл), низкие линейные поля кажущейся поляризуемости (0,5% - 1,0%) соответствующие альбит-актинолит-эпидотовым, альбит-хлорит-актинолит-эпидотовым сланцам

- золоторудные тела по данным поисково-оценочных работ 2007-2008 г.г.

1. Золоторудные кварц-альбитовые метасоматиты
2. Золотоносные жилы

месторождения и их названия

- тектонические нарушения.

ЛИТЕРАТУРА

1 В.И. Аронов Методы математической обработки геологических данных на ЭВМ.

2 В.Н. Страхов – геофизик и математик.

3 Справочник по математическим методам в геологии.

4 Никитин А.А. Теоретические основы обработки геологической информации.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Лабораторная работа № 1 Описание поверхностей геологических объектов

Лабораторная работа № 2 Описание геологической поверхности кубическими сплайнами

Лабораторная работа № 3 Аналитическая аппроксимация естественного электрического поля

Лабораторная работа № 4 Подсчет ресурсов по геофизическим данным

Лабораторная работа № 5 Выделение разломов по комплексу геофизических методов

Лабораторная работа № 6 Корреляция содержания железа и магнитной восприимчивости

Лабораторная работа № 7 Анализ геофизических полей

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебно-методическому комплексу
_____ С.А. Упоров

МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТА

по дисциплине

ЭЛЕКТРОННЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Специальность:

21.05.03 Технология геологической разведки

форма обучения: очная, заочная

Автор: Сковородников И. Г., Кузин А. В.

Екатеринбург

2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие…….5

1. Назначение первичных преобразователей, их характеристики и классификация…….5

Контрольные вопросы……...11

2. Преобразователи параметрического типа……...12

2.1. Резистивные преобразователи……...12

2.1.1. Контактные преобразователи…….12

2.1.2. Реостатные преобразователи……..13

2.1.3. Тензометрические преобразователи……..16

2.1.4. Электролитические преобразователи……19

2.1.5. Терморезистивные преобразователи……21

2.1.6. Магниторезистивные преобразователи…….23

2.1.7. Фотоэлектрические преобразователи……25

2.2. Индуктивные преобразователи……26

2.2.1. Индуктивные преобразователи с изменяемым воздушным зазором…….27

2.2.2. Магнитоупругие преобразователи…….29

2.2.3. Магнитомодуляционные преобразователи……...30

2.3. Емкостные преобразователи……..34

Контрольные вопросы……..35

3. Преобразователи генераторного типа …...……36

3.1. Преобразователи индукционной э.д.с……..36

3.1.1. Преобразователи индукционной э.д.с. со взаимным перемещением магнита и катушки индуктивности……..36

3.1.2. Преобразователи индукционной э.д.с. со стационарным размещением магнита и катушки индуктивности……..38

3.2. Преобразователи гальваномагнитной э.д.с……..41

3.2.1. Преобразователи Холла……..41

3.2.2. Преобразователи Виганда……...42

3.3. Преобразователи пьезоэ.д.с……...44

3.4. Преобразователи термоэ.д.с……..45

3.5. Преобразователи фотоэ.д.с……46

Контрольные вопросы……...49

4. Радиационные преобразователи……...49

4.1. Газоразрядные детекторы……..50

4.2. Сцинтилляционные детекторы……..53

4.3. Полупроводниковые детекторы……56

Контрольные вопросы……...56

Литература……..57

ПРЕДИСЛОВИЕ

Цель данного пособия – познакомить студентов с применением различных электрических датчиков в геофизической аппаратуре, облегчить им усвоение соответствующих разделов курса «Геофизическая аппаратура» и выполнение курсового проектирования по нему.

Необходимость издания пособия обусловлена тем, что в опубликованных работах по первичным преобразователям рассматриваются датчики общетехнического применения, в то время, как датчики разнообразной геофизической аппаратуры имеют ряд особенностей, связанных со спецификой условий их эксплуатации.

В пособии рассмотрены физические основы и устройство датчиков всех типов, входные и выходные параметры, указаны их достоинства и недостатки и приведены примеры применения в конкретной геофизической аппаратуре.

В качестве примеров в ряде случаев использованы оригинальные разработки автора.

В конце каждой главы приведен перечень контрольных вопросов для самостоятельной проверки усвоения материала студентами.

1. НАЗНАЧЕНИЕ ПЕРВИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ, ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ И КЛАССИФИКАЦИЯ

Первичные преобразователи в геофизической аппаратуре (ГА) являются теми элементами, которые вырабатывают сигнал информации об измеряемой величине. По этой причине первичные преобразователи ГА называются также измерительными преобразователями. Другими синонимами термина «первичный преобразователь» являются «датчик», «детектор», «чувствительный

элемент», «сенсор», «трансмиттер» [4,15,23]. Правда, в специальной литературе существуют различные толкования термина «датчик», наиболее распространенного из перечисленных терминов. Так, например, в монографии К. Бриндли [4], датчик рассматривается как пассивный преобразователь, т.е. преобразователь получающий энергию для своей работы от измеряемой величины. В других источниках [1,16] под датчиком понимается конструктивно законченное устройство, которое, кроме первичного преобразователя, может содержать и другие элементы (усилитель сигнала, источник питания и т.п.) и которое устанавливается на удалении от наблюдателя. В данном пособии, как и в большей части специальной литературы, термин «датчик» будет использоваться как синоним первичного или измерительного преобразователя.

Важнейшими характеристиками датчиков служат: чувствительность, точность (достоверность) информации об измеряемой величине, надежность и долговечность, стабильность работы при изменении внешних условий, быстродействие, вид зависимости выходного сигнала от измеряемой величины (линейная, нелинейная, реверсивная, нереверсивная и т.п.).

Поясним некоторые из перечисленных характеристик.

Чувствительность преобразователя, которую также называют **коэффициентом передачи**, представляет собой отношение изменения выходного сигнала y, к изменению входного сигнала x. Различают три вида коэффициентов передачи: статический, относительный и дифференциальный.

Статический коэффициент передачи используется для определения свойств преобразователей с линейной характеристикой: $K_{ст}=y/x$.

Дифференциальный коэффициент передачи применяется для датчиков с нелинейной характеристикой: $K_{диф}=\lim\Delta y/\Delta x \approx dy/dx$. Значение этого коэффициента непостоянно и зависит от величины входного сигнала x.

Относительный коэффициент передачи равен отношению относительного изменения сигнала на выходе датчика к относительному изменению сигнала на его вход $K_{отн}=(\Delta y/y)/(\Delta x/\Delta x)$. Этот коэффициент является величиной

безразмерной и удобен для сравнения свойств преобразователей, различных по принципу действия и конструкции.

У некоторых измерительных преобразователей вследствие трения покоя, шумов измерительной схемы, гистерезиса и др. причин изменение выходного сигнала появляется только тогда, когда измеряемая величина достигает определенного уровня. Этот уровень называется порогом **чувствительности** x_n.

Во время работы первичного преобразователя на него, кроме измеряемой величины, воздействуют и другие сигналы – помехи, например, изменения температуры, внешнего давления, вибрации, изменения напряжения питания и пр. Результаты воздействия помех проявляются в виде погрешностей измерений: абсолютных, относительных, приведенных.

Абсолютная погрешность – это разность между измеренным y и действительным (расчетным) значениями выходной величины y_0: $\Delta y = y_{изм} - y_0$.

Относительная погрешность – это отношение абсолютной погрешности к действительному значению выходной величины в процентах: $\delta = (\Delta y / y_0) \cdot 100$.

Приведённая погрешность – это отношение абсолютной погрешности к наибольшему действительному значению выходной величины: $\varepsilon = \Delta y / y_{max}$. Для измерительных приборов приведенная погрешность определяет их класс точности.

В зависимости от режима, для которого определяется абсолютная или относительная погрешность, различаются **статические** и **динамические** погрешности (ошибки). Приведенная погрешность определяется только для установившегося (статического) режима [10].

Характер зависимости выходного сигнала от измеряемой величины $y=f(x)$ в установившемся режиме называется **статической** характеристикой преобразователя.

Наиболее удобными в работе и потому наиболее распространенными являются датчики, имеющие линейную характеристику. Если характеристика

датчика нелинейна, то для формирования выходного сигнала могут применяться системы линеаризации. В некоторых случаях, например, если измеряемая величина изменяется нелинейным образом, удобнее использовать преобразователи с нелинейной статической характеристикой.

В зависимости от того, как на выходную величину влияет изменение знака измеряемой величины, статические характеристики бывают: **нереверсивными** (когда знак выходного сигнала остается постоянным во всем диапазоне измерений) и **реверсивными** (когда выходной сигнал изменяет свой знак вслед за измерявшейся величиной).

Следует упомянуть еще одну из характеристик измерительных преобразователей – **гистерезис**, который проявляется в несовпадении значений выходного сигнала при одном и том же значении измеряемой величины в зависимости от уменьшения или увеличения последней в момент измерения.

Надежность преобразователя – это способность работать в течение определенного периода времени при заданных условиях эксплуатации.

Надежность преобразователей, так же, как надежность, сложных электронных или механических устройств вообще, характеризуется вероятностью безотказной работы, средним временем безотказной работы и интенсивностью отказов – отношением числа отказавших устройств в определяемый промежуток времени к числу работоспособных в начале этого промежутка.

График зависимости интенсивности отказов от времени эксплуатации имеет характерную корытообразную форму. Первый участок графика ($0 – t_1$) называется "временем приработки", в этот период интенсивность отказов велика из-за того, что здесь проявляются дефекты сборки, выходят из строя некондиционные детали и т. п. Второй участок $t_1 – t_2$ называется "периодом условной долговечности», здесь отказы могут быть связаны, в основном, со случайными причинами. Третий участок $t_2 – \infty$ называется "периодом старе-

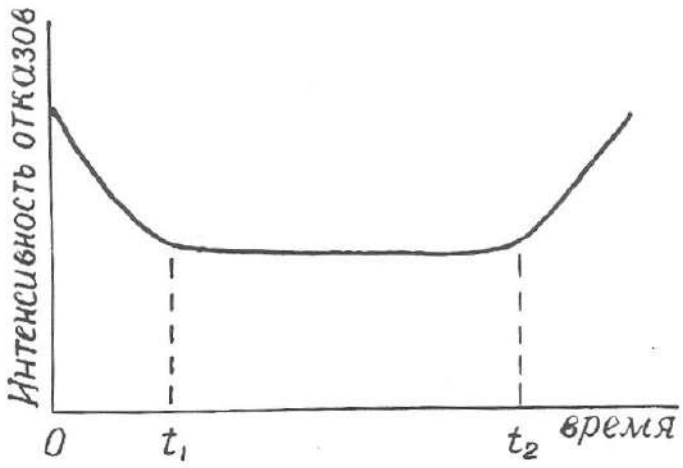


Рис. 1.1. Зависимость и интенсивности отказов от времени эксплуатации преобразователя

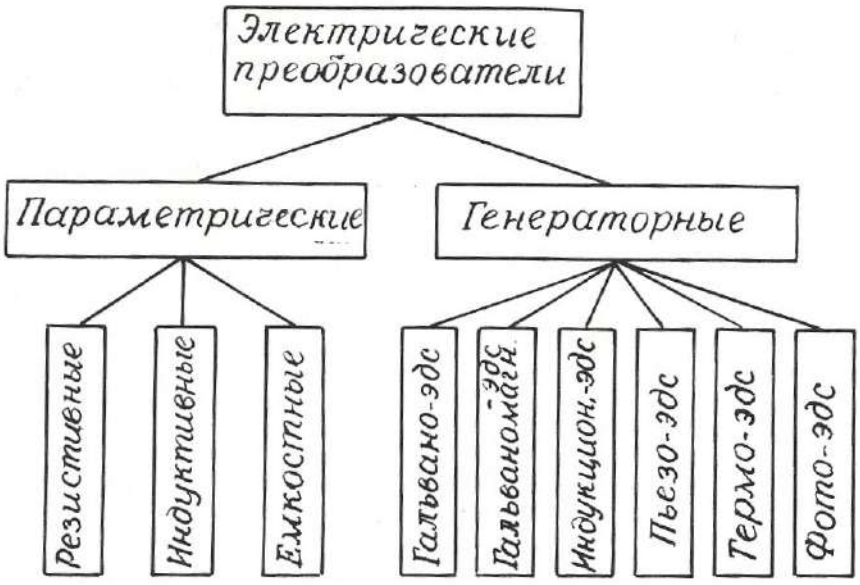


Рис. 1.2. Классификация электрических преобразователей

ния», здесь интенсивность отказов растет из-за того, что детали преобразователя вырабатывают свой ресурс (рис. 1.1).

Пути повышения надежности преобразователей – это упрощение их устройства, использование элементов с большой вероятностью безотказной работы, «разгруженный» режим эксплуатации.

Подавляющее большинство датчиков геофизической аппаратуры преобразуют измеряемую величину в электрический сигнал, хотя имеются датчики, например, в гравиразведочных приборах, выходная величина которых не является электрической.

Электрические преобразователи, применяемые в геофизической аппаратуре, крайне разнообразны по принципу действия и конструкции.

Основными признаками, позволяющими классифицировать датчики, являются: назначение, принцип действия, вид входного и выходного сигналов, наличие или отсутствие источников питания.

По назначение электрические датчики делятся на преобразователи неэлектрических величин в электрические и преобразователи одних электрических величин в другие. Соответственно входные величины измерительных преобразователей могут иметь как электрическую, так и неэлектрическую природу. Это могут быть характеристики различных физических полей (например, магнитная индукция, температура, сила тяжести, э.д.с. естественных электрических полей), разнообразные свойства горных пород, руд и растворов (плотность, электрическое сопротивление, магнитная восприимчивость, радиоактивность), геометрические и технические параметры буровых скважин (их диаметр, углы искривления), скорость перемещения, механические усилия и т. д.

Выходными величинами электрических датчиков могут, быть: э.д.с., сила тока, частота тока, импульсы тока или комбинации импульсов различной длительности и амплитуды, а также сопротивление, емкость или индуктивность электрической цепи.

По принципу действия электрические преобразователи делятся на **параметрические**, изменяющие пассивные элементы электрической цепи (сопротивление, емкость, индуктивность), и **генераторные**, вырабатывающие э.д.с. различной физической природы. В свою очередь, среди параметрических датчиков выделяются: резистивные, емкостные и индуктивные, а среди генераторных: датчики гальванической, гальваномагнитной, индукционной, фото-, пьезо- и термоэ.д.с. (рис. 1.2).

Особняком стоят радиационные преобразователи (детекторы радиоактивных излучений), которые имеет сложную структуру.

Каждый из видов датчиков, изображенных на рис. 1.1, имеет свои разновидности, отличающиеся по конструктивному исполнению.

По наличию или отсутствию специальных источников питания датчики подразделяются на **пассивные**, получающие энергию от измеряемой величины, и активные, питающиеся от внешнего источника.

В следующих разделах пособия будут рассмотрены физические свойства, особенности конструкции, достоинства и недостатки, а также примеры применения в конкретных образцах геофизической аппаратуры всех видов датчиков, представленных на рис. 1.2.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение измерительного преобразователя.
2. Какие синонимы существуют у термина «измерительный преобразователь»?
3. Что такое чувствительность преобразователя?
4. Назовите виды коэффициентов передачи датчика.
5. Назовите виды погрешностей преобразователей, укажите, какие причины их вызывают.
6. Что такое статическая характеристика преобразователя?
7. Что такое надежность преобразователя?
8. Поясните график зависимости интенсивности отказов от времени (рис. 1.1).

9. По каким признакам производят классификацию электрических преобразователей?
10. Назовите входные и выходные величины электрических преобразователей в геофизической аппаратуре.
11. На какие две большие группы делятся электрические преобразователи по принципу действия?
12. Поясните классификацию преобразователей, приведенную на рис. 1.2.

2. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ТИПА

2.1. Резистивные преобразователи

В преобразователях этого вида изменения измеряемого параметра преобразуются в изменения **активного сопротивления** электрической цепи.

В соответствии с выражением $R=\rho \cdot l/S$ (2.1) изменения сопротивления R могут происходить за счет изменения геометрических размеров проводника (длины l и поперечного сечения S) или его удельного сопротивления ρ. К преобразователям с изменяемыми размерами относятся контактные, реостатные, потенциометрические, тензометрические, угольные и электролитические датчики. К преобразователям с изменяемым удельным сопротивлением – электролитические, терморезистивные и некоторые фотоэлектрические датчики.

2.1.1. Контактные преобразователи

Контактные преобразователи представляют собой простейшую разновидность преобразователей резистивного типа. В одном крайнем положении их сопротивление равно бесконечности, в другом близко к нулю.

Работой контактных преобразователей могут управлять механические (линейное или угловое перемещение) или различные физические параметры (температура, магнитное поле, электрический ток).

Контактные преобразователи составляют основу большинства реле, широко применяемых в системах автоматического управления [8,11]. В последнее время широкое распространение получили **герконы** – миниатюрные герметизированные контактные преобразователи, управляемые магнитным полем.

Достоинства контактных преобразователей составляют их простата и малая стоимость, универсальность (они могут работать в цепях как постоянного, так и переменного тока); недостатки – искрение и «дребезг» контактов, возможность ложных срабатываний контактов от тряски.

В геофизической аппаратуре контактные преобразователи используются в различных измерителях постоянных напряжений для преобразования этих напряжений в переменные, которые потом подвергаются усилению на электронных усилителях. Примером могут служить электроразведочные измерители ЭСК-1, АТ-72, самопишущие каротажные потенциометры ПАСК-8 и ПАСК-9. Контактные преобразователи используются также в схемах управления многочисленных скважинных приборов (в пластовом наклономере НП-3, расходомерах с раскрывающимся пакером и др.).

Герконы используются в скважинных расходомерах РСМ, РГД, ДГД и др. [21].

2.1.2. Реостатные преобразователи

Простейший реостатный преобразователь – это переменный резистор, подвижный контакт которого перемещается вследствие изменения измеряемой величины – линейного перемещения, давления, угла наклона, направления магнитного поля и т.п.

Реостатный преобразователь (рис. 2.1, а) может быть включен по потенцио-метрической схеме (рис. 2.1, б), в этом случае он должен быть отнесен к преобразователям генераторного типа.

Как правило, реостатные преобразователи выполняют в виде намотки из изолированной проволоки высокого сопротивления (из манганина, константана, вольфрама) на каркасе из изоляционного материала. Форма каркаса может быть различной: прямоугольной, кольцевой или более сложной конфигурации в зависимости от входного параметра и необходимой зависимости $R= f(x)$.

Проволочные реостатные преобразователи являются дискретными, т.к. непрерывному изменению входной величины x соответствует скачкообразное изменение сопротивления R определяемое переходом подвижного контакта с одного витка провода на другой. Это обуславливает и погрешность измерений, которая уменьшается с уменьшением диаметра проволоки и увеличением числа витков W. Статический коэффициент передачи реостатного датчика $K_{ст}=z\cdot W/l$, где z – сопротивление одного витка, l – длина намотки.

Обычная относительная погрешность датчиков $\delta= 0{,}2 – 0{,}5$ %.

Преимущества реостатных датчиков: простота конструкции, малый вес и габариты, возможность включения в цепь как постоянного, так и переменного тока, возможность получения необходимой статической характеристики $R=f(x)$, недостатки: наличие подвижного механического контакта, что уменьшает надежность датчика, необходимость какого-то усилия для перемещения этого контакта, влияние температуры.

Благодаря своей простоте и универсальности реостатные преобразователи широко используются в геофизической аппаратуре для исследования скважин: в каверномерах (КФ, КМ, СКП-1 и др.), в инклинометрах (ИК-1, ИК-2, МИР-36, ИГ-36 и др.) [2,9,12], в датчиках натяжения кабеля, в некоторых уровнемерах. Так, например, в скважинном уровнемере конструкции УГИ [18,26], изменение уровня жидкости над прибором, точнее, гидростатическое давление столба жидкости над ним преобразуется в изменение уровня токопроводящей жидкос-

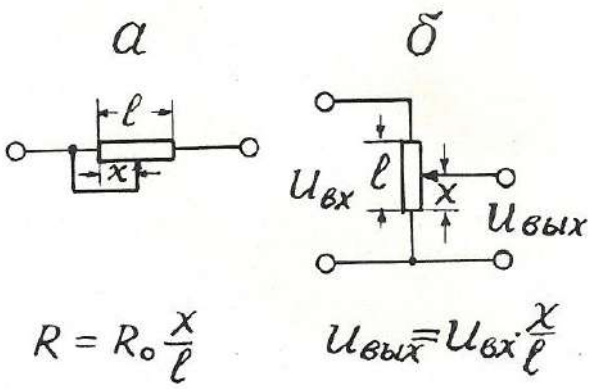


Рис. 2.1. Реостатный преобразователь (а) и его включение по потенциометрической схеме (б).

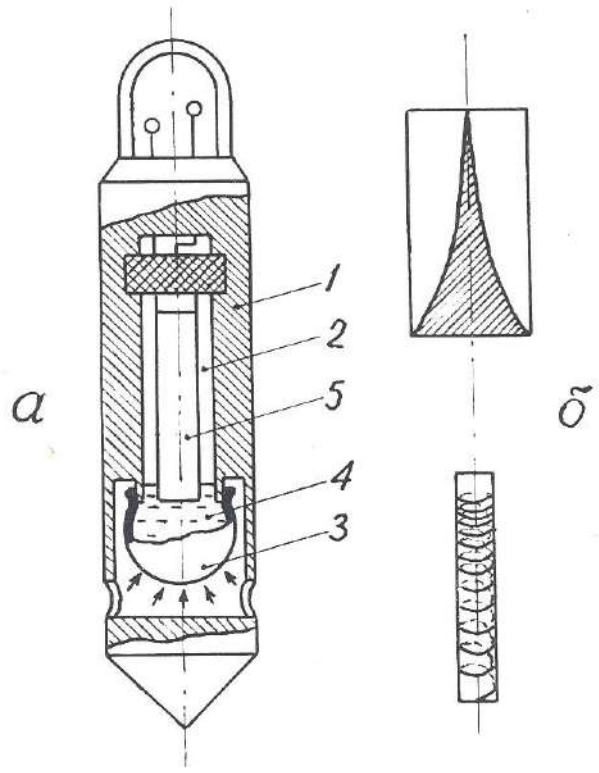


Рис. 1.2. Пример применения реостатного преобразователя в скважинном уровнемере с линейной входной характеристикой: а – конструкция уровнемера; б – варианты выполнения реостата; 1 – корпус уровнемера; 2 – измерительная камера; 3 – гибкий резервуар; 4 – токопроводящая жидкость; 5 – реостат.

ти в измерительной камере, отделенной от внешней среды гибкой оболочкой (рис. 2.2). Вдоль продольной оси камеры располагается реостатный преобразователь, подвижным контактом которого служит токопроводящая жидкость. Поскольку давление P в измерительной камере и ее объем V при постоянной температуре связаны соотношением PV=const [7], то одинаковые приращения давления P .(уровня жидкости) вызывают неодинаковые перемещения уровня токопроводящей жидкости в измерительной камере. Для получения линейной статической характеристики реостатный преобразователь в данном уровнемере выполнен в виде неравномерной намотки или высокоомной пленки переменной ширины таким образом, чтобы приращение сопротивления реостата было обратно пропорционально квадрату перемещения подвижного контакта, т.е. уровня токопроводящей жидкости.

2.1.3. Тензометрические преобразователи

Действие тензопреобразователей основано на изменении сопротивления проводников и полупроводников при их растяжении или сжатии [15].

Тензоэлементы (или тензорезисторы) состоят из тонкой проволоки или фольги, сложенной несколько раз в форме меандра и вклеенной между эластичными бумажными, пленочными или фетровыми подкладками. Толщина проволоки (или фольги) от 0,02 до 0,05 мм. Основные конструктивные формы тензоэлементов представлены на рис. 2.3.

Изменение электрического сопротивления тензоэлемента пропорционально относительной деформации детали в месте наклейки последнего. Относительный коэффициент передачи тензодатчика $K_{отн}=(\Delta R/R)/(\Delta l/l)$. Материал для тензоэлементов должен характеризоваться возможно большей тензочувствительностью и возможно меньшим температурным коэффициентом. Обычно используются сплавы: константан, манганин, нихром, а также чистые металлы: никель, висмут. Очень высокую тензочувствительность, в 60-80 раз

выше, чем у металлов, имеют полупроводники: германий, кремний и др. Полупроводниковые тензоэлементы получают выращиванием кристаллов полупроводника на мембране из диэлектрического металла (например, датчики «кремний на сапфире»).

Достоинства тензорезисторных преобразователей: простота конструкций, малые габариты, высокая точность, безинерционность; недостатки: невысокая чувствительность, зависимость сопротивления от температуры.

Низкая чувствительность тензорезисторных преобразователей требует применения усилителей выходного сигнала, а термозависимость – применения специальных мер для устранения влияния температуры.

Тензопреобразователи находят применение в датчиках силы натяжения каротажного кабеля с подвесным роликом ДНТ-033 ($\delta \leq 1{,}5\%$ при усилии до 500 *Н*) [2,17], в некоторых опробователях пластов в качестве измерителей пластового давления (например, в ОПД-7-10), в некоторых скважинных уровнемерах типа погружных манометров [2].

Автором тензорезисторный преобразователь применен в расходомере РГЖ-1, не содержащем вращающихся деталей [19]. Чувствительным элементом этого прибора служат две гибкие пластины, установленные вдоль измеряемого потока. Поскольку давление в движущемся флюиде понижается, пластины прогибаются навстречу друг другу тем больше, чем выше скорость потока (рис. 2.4). Прогиб пластин преобразуется в электрический сигнал с помощью наклеенных на них тензоэлементов. Для устранения влияния температуры на пластине наклеены 4 тензоэлемента (2 вдоль нее и 2 поперек), соединенные по мостовой схеме. В одну диагональ моста подается переменный ток питания (частота I кГц), к другой диагонали подключен усилитель. Чувствительность описанного расходомера составляет 0,05 л/с.

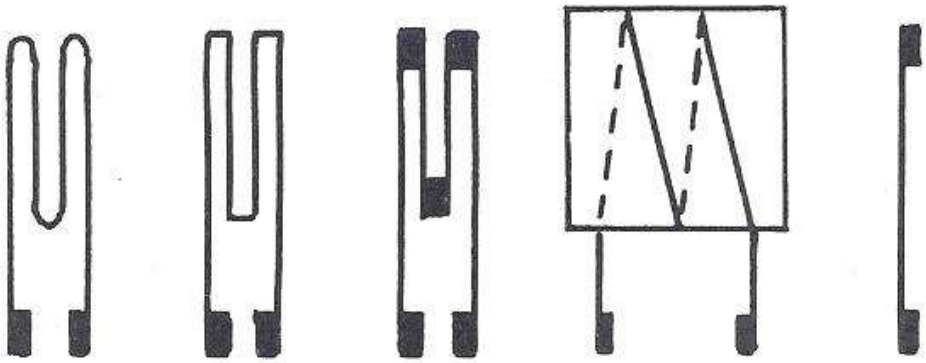


Рис. 2.3. Разновидности тензорезисторов

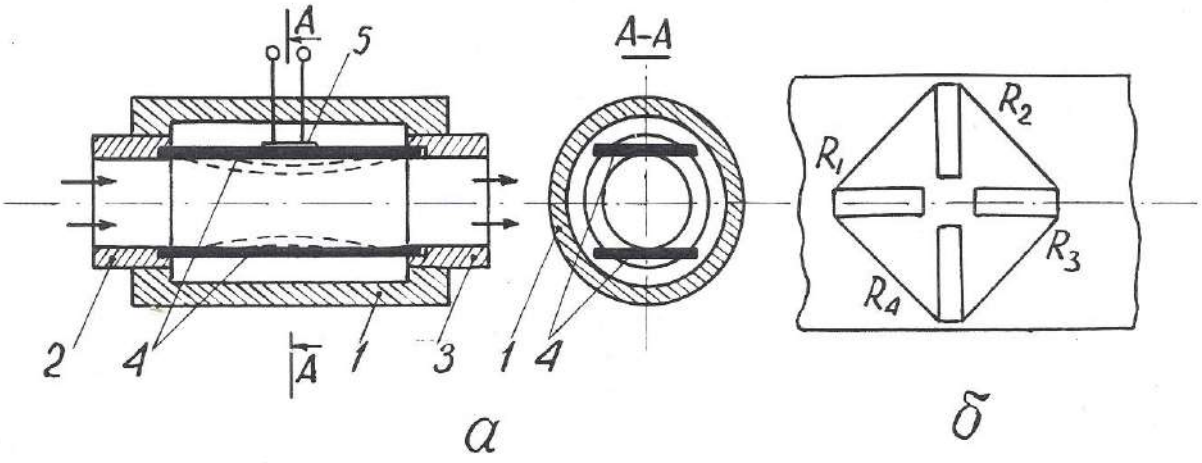


Рис. 2.4. Принцип действия расходомера РГЖ-1 (а) и размещение тензорезисторов на упругой пластине (б): 1 – корпус расходомера; 2 – входной канал; 3 – выходной канал; 4 – упругие пластины; 5 – тензометрический преобразователь прогиба пластины в электрический сигнал

2.1.4. Электролитические преобразователи

Преобразователи этого типа основаны на изменении электрического сопротивления между помещенными в электролит электродами в зависимости от расстояния между ними, площади соприкосновения с электролитом или проводимости последнего (2.1). Электролитические датчики используются для измерения угловых и линейных перемещений, а также для определения сопротивления электролита. Во избежание погрешностей, связанных с электролизом и электродной поляризацией, их включают, как правило, в цепь переменного тока.

Достоинства датчиков этого типа заключаются в простоте конструкции и способности пропускать большие токи; недостатки – в зависимости сопротивления электролита от температуры (при изменении последней на 1° электропроводность растворов изменяется на 1,5-2,5%).

В геофизической аппаратуре электролитические датчики используются в резистивиметрах всех видов: скважинных и переносных (например, в приборе ПР-1).

Еще один пример применения датчик этого типа устройство для определения направления и скорости потока подземных вод [20]. Это устройство содержит цилиндрическую измерительную камеру с перфорированными стенками, по окружности которой размещены радиальные электроды а в середине – центральный (рис. 2.5). Каждый из электродов подсоединен к своей жиле многожильного каротажного кабеля (например, кабеля КГ17-60-180ШМ. Внутри камеры располагается также магнитная стрелка с экраном из изоляционного материала на северном конце. Измерительная камера закрывается крышкой и заполняется электролитом через специальные отверстия в ней. Затем устройство опускают в скважину и устанавливают напротив исследуемого водоносного горизонта. По кабелю

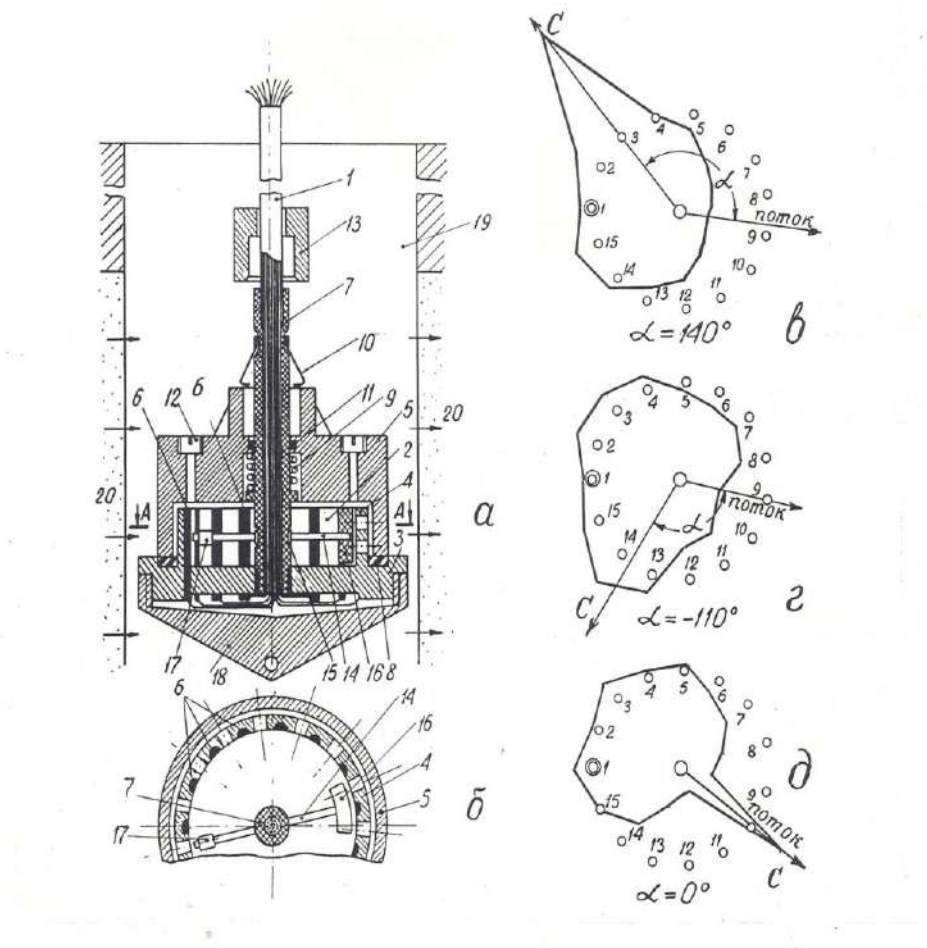


Рис. 2.5. Устройство для определения направления и скорости потока (а, б) и результаты измерений магнитного азимута потока (в-д): 1 – многожильный каротажный кабель; 2 – измерительная камера; 3 – изоляционный диск; 4 – перфорированные стенки камеры; 5 – крышка; 6 – радиальные электроды; 7 – центральный электрод; 8 – резиновая прокладка; 9 – сжатая спиральная пружина; 10 – пружинные защелки; 11 – резиновое кольцо; 12 – заливная пробка; 13 – сбивающий грузик; 14 – магнитная стрелка; 15 – скользящий подшипник; 16 – изоляционный экран; 17 – противовес; 18 – нижний наконечник.

опускают сбивающий грузик, который приводит в действие пружину, отбрасывающую крышку вверх по кабелю. Движением подземных вод электролит из измерительной камеры вымывается по направлению потока через перфорацию в стенках. Магнитная стрелка ориентируется по направлению магнитного меридиана, а экран на ее северном конце перекрывает один из радиальных электродов. На поверхности производят измерения электрического сопротивления между центральным и каждым из радиальных электродов. Минимальное сопротивление указывает направление потока подземных вод, а максимальное – направление на север. Скорость потока определяют по скорости вымывания электролита из измерительной камеры, повторяя измерения через определенные интервалы времени. При использовании 17-жильного кабеля устройство обеспечивает абсолютную погрешность в измерении направления потока, не превышающую ±12°.

2.1.5.Терморезистивные преобразователи

Терморезистивные преобразователи основаны на свойстве металлов и полупроводников изменять свое сопротивление под действием температуры Т.

Зависимость сопротивления металлов от температуры в общем случае нелинейна, однако, для ограниченных интервалов температур ее можно представить в виде линейной двучленной функции $R_т=R_0[1+\alpha(T-T_0)]$, где R_0 – сопротивление при начальной температуре T_0, а α – температурный коэффициент сопротивления для интервала $T – T_0$.

Основным материалом для терморезисторов являются чистые металлы: платина, медь, никель, которые обладают в интервале от О до 100°С положительным $\alpha=0{,}0030–0{,}0068$ $(град.С)^{-1}$.

Известны также объемные полупроводниковые терморезисторы (термисторы). Их сопротивление уменьшается с повышением температуры по экспоненте, в среднем для них $\alpha=0{,}03\text{-}0{,}04$ $(град.\ С)^{-1}$, но значение α сильно

зависит от температуры. Чувствительность (статический коэффициент передачи) терморезисторов $K_{ст}=\Delta R/\Delta T=\alpha R_0$.

Достоинства терморезистивных преобразователей: простота конструкции, малые габариты, возможность установки в труднодоступных местах. Однако им присущи и важные недостатки. Во-первых, это постоянство α лишь в ограниченном диапазоне температур и, во-вторых, инерционность, приводящая к большим динамическим погрешностям. Как известно, термопреобразователь приобретает температуру среды по закону $\Delta T=\Delta T_0 \cdot e^{-t/\tau}$ где ΔT_0 - начальная разность температур, t – время, τ – постоянная времени преобразователя, зависящая от его конструкции и теплопроводности, а также тепловых свойств среды.

В геофизическом приборостроении преобразователи этого типа находят применение в скважинных термометрах электрических (СТС-2, ЭТМИ-55 и др.) и электронных (ТЭГ-36, ТЭГ-60 и др.).

Чувствительный элемент всех скважинных термометров представляет собой тонкую (0,02-0,03 мм) медную проволочку, сложенную в несколько раз и помещенную в тонкостенную медную трубку длиной около 30 см, омываемую скважинным флюидом [9].

Точно так же устроен чувствительный элемент скважинных расходомеров типа термоанемометров СТД-2, СТД-4 [2]. Этот термоэлемент включается в мостовую измерительную схему и нагревается до температуры, превышающей температуру исследуемого потока. Мостовая схема балансируется при размещении чувствительного элемента в неподвижной жидкости. Когда жидкость приходит в движение, она охлаждает нагретый термоэлемент, тем сильнее, чем выше скорость ее движения.

В газокаротажных станциях (АГКС-64, АГКС-4 и др. для определения суммарного газосодержания в газовоздушной смеси эта смесь подается на термочувствительный элемент в виде тонкой платиновой проволочки, нагретой до 850° С и включенной в сбалансированную мостовую схему. Если в

анализируемой смеси имеются углеводородные газы, то при 850°С они сгорают, выделяющееся тепло повышает температуру проволочки, увеличивая ее сопротивление и нарушая баланс мостовой схемы [17].

Аналогичным образом действуют приборы для определения содержания СО в выхлопных газах автомобиля [6].

Известны также устройства для определения направления потока подземных вод [24], содержащие нагреватель и расположенные вокруг него термисторы. По измерениям температуры последних определяют, в каком направлении идет перенос тепла, т.е. происходит движение подземных вод.

2.1.6. Магниторезистивные преобразователи

Эти преобразователи основаны на свойстве некоторых материалов изменять свое электрическое сопротивление под действием магнитного поля (эффект Гаусса). Таким свойством обладает, например, сплав пермаллой (80% никеля, 20% железа). Степень изменения сопротивления магниторезистора зависит от магнитной индукции поля B и угла θ между ее направлением и направлением тока [6,16,22].

Магниторезисторы изготавливаются по тонкопленочной технологии в форме меандров (рис. 2.6).

Еще большим магнитоэлектрическим эффектом, чем сплавы металлов, обладают полупроводники (антимонид индия InSb и арсенид индия InAs).

Увеличение сопротивления магниторезисторов объясняется увеличением пути движения электронов и дырок под действием силы Лоренца.

Чувствительность магниторезистивных датчиков $K_{диф}=\Delta R/\Delta B$ зависит от величины магнитной индукции: $\Delta R=R_0 \cdot A(\nu B)^n$, где A – так называемый «коэффициент формы», ν – подвижность электронов: n – постоянный коэффициент (n=1–2), зависящий от B.

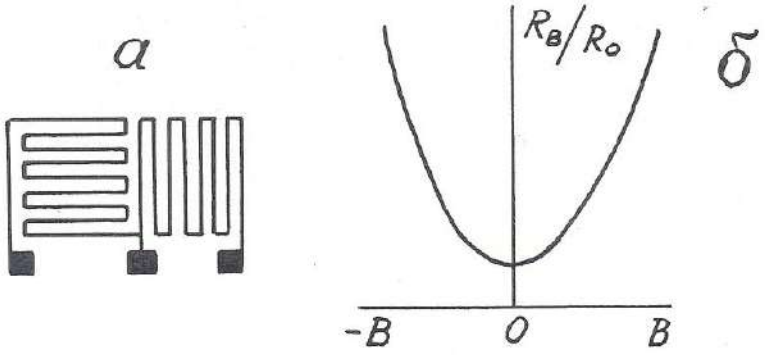


Рис. 2.6. Форма магниторезистора (а) и зависимость приращения его сопротивления от магнитной индукции (б)

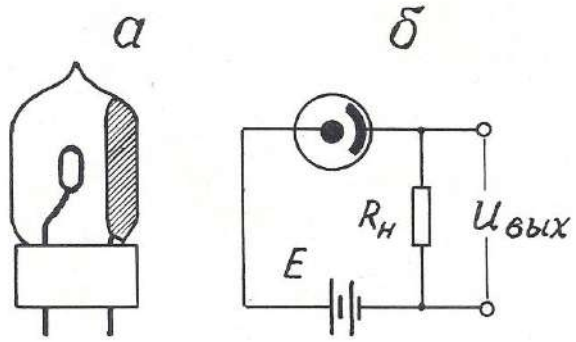


Рис. 2.7. Конструкция фотоэлемента с внешним эффектом (а) и включение его в измерительную схему (б)

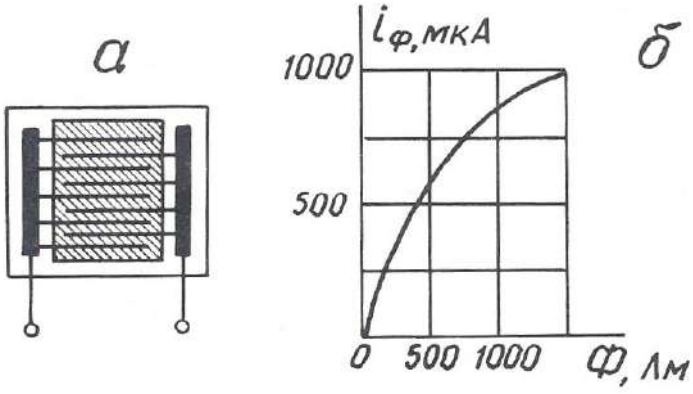


Рис. 2.8. Конструкция фотоэлемента с внутренним фотоэффектом (а) и зависимость фототока от светового потока (б)

При больших B значение n=1, поэтому при использовании магниторезисторов применяют магнитное смещение, помещая их в поле электромагнита с B=0,3 – 0,5 Тл.

Недостатки магниторезисторов: наличие температурного влияния и потребность в сильных магнитных полях.

Магниторезисторы в геофизике могут быть использованы в скважинных расходомерах и магнитных меткоуловителях каротажных станций.

2.1.7. Фотоэлектрические преобразователи

Фотоэлектрические преобразователи (фотоэлементы) основаны на явлении внешнего (электровакуумные и газонаполненные) или внутреннего (полупроводниковые) фотоэффекта.

Фотоэлемент с внешним фотоэффектом представляет собой электронную лампу с двумя электродами, один из которых (фотокатод) покрыт светочувствительным слоем (рис. 2.7). Возрастание фототока при увеличении приложенного напряжения происходит до величины тока насыщения, при котором все электроны, испускаемые фотокатодом под действием светового потока, достигают анода.

Фотоэлемент с внутренним фотоэффектом (фоторезистор) состоит из стеклянной пластины, на которой вытравлены входящие друг в друга гребневидные системы штрихов, заполненные электропроводным веществом (платина, золото). Пластина покрывается тонким слоем полупроводникового светочувствительного материала (рис. 2.8).

Чувствительность фотоэлементов $K_{диф}=\Delta R/\Delta\Phi$ непостоянна и нелинейно зависит от светового потока Ф. Кроме того, фотоэлементы обладают еще и спектральной избирательностью» т.е. чувствительностью к световому излучению определенной длины волны.

Фотоэлементы могут быть использованы и в режиме источников тока, т.е. как генераторные преобразователи фотоэ.д.с.

Фотопреобразователи находят применение в приборах фотокаротажа, предназначенных для дифференциации разрезов скважин по цвету пород, в скважинных расходомерах (например, в ТСР-70Ф) в некоторых инклинометрах. Так, автором совместно с профессором. А.В.Давыдовым предложен датчик угла наклона буровой скважины для непрерывных измерений [27]. Этот датчик содержит измерительную камеру 1, частично заполненную жидкостью 2 с высоким коэффициентом поверхностного отражения, например, ртутью или сплавом Вуда, а над жидкостью соосно размещены источник света 3 и кольцевой фотопреобразователь 4 (рис. 2.9). При вертикальном положении датчика весь свет источника, отраженный от поверхности жидкости, попадает на фотопреобразователь, и сигнал на его выходе максимален. При отклонении датчика от вертикали поверхность жидкости наклоняется относительно оси камеры, и часть отраженного света уходит за пределы фотопреобразователя. Выходной сигнал уменьшается тем сильнее, чем больше зенитный угол скважины.

2.2. Индуктивные преобразователи

Принцип действия индуктивных преобразователей основан на изменении электрического сопротивления *z* катушки индуктивности при изменении магнитного сопротивления ее сердечника. В свою очередь, магнитное сопротивление сердечника может быть изменено либо за счет изменения величины воздушного зазора в нем, либо за счёт изменения магнитных свойств материала, из которого он состоит.

2.2.1. Индуктивные преобразователи с изменяемым воздушным зазором

Входной величиной преобразователей этого типа обычно служат линейные или угловые перемещения. Чувствительность датчика $K_{диф}=\Delta z/\Delta x$.

Конструкции датчиков весьма разнообразны, некоторые из них, наиболее распространенные, представлены на рис. 2.10.

Независимо от конструкции датчика, его индуктивное сопротивление $z=j\ \omega\ L$, где ω – круговая частота тока в катушке; L – ее индуктивность. $L=W^2/R_\mu$, где W – число витков в катушке; R_μ – магнитное сопротивление сердечника. $R_\mu=R_ж+R_в$, где $R_ж$ – магнитное сопротивление железа сердечника; $R_в$ – магнитное сопротивление воздушного зазора. $R_в>>R_ж$. $R_в=\delta/(\mu_0\cdot S)$, где δ – длина воздушного зазора; S – его площадь; μ_0 – абсолютная магнитная проницаемость воздуха. Таким образом, $z=-j\ \omega\ W^2\mu_0 S/\delta$, т.е. z обратно пропорционально δ и зависимость $z=f(\delta)$ нелинейна.

Линеаризовать эту зависимость удается в конструкции так называемых «дифференциальных» индуктивных преобразователей (рис. 2.11). В этих преобразователях, используются, две катушки индуктивности, включенные в мостовую схему и расположенные таким образом, что, когда индуктивное сопротивление одной увеличивается, сопротивление другой падает.

Достоинства индуктивных: преобразователей: отсутствие открытых электрических контактов, большая мощность вырабатываемого сигнала; недостаток – наличие электромагнитного взаимодействия между катушкой и сердечником (или его подвижной частью), отсюда – так называемая «реакция преобразователя».

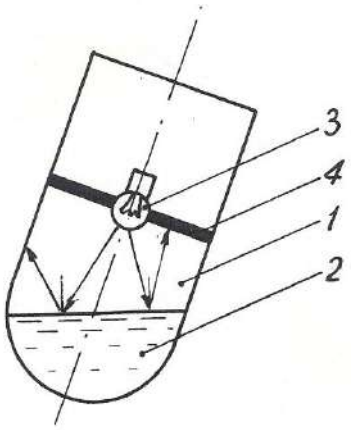


Рис. 2.9. Датчик угла наклона буровой скважины: 1 – измерительная камера; 2 – жидкость с высоким коэффициентом поверхностного отражения; 3 – источник света; 4 – кольцевой фотоприемник

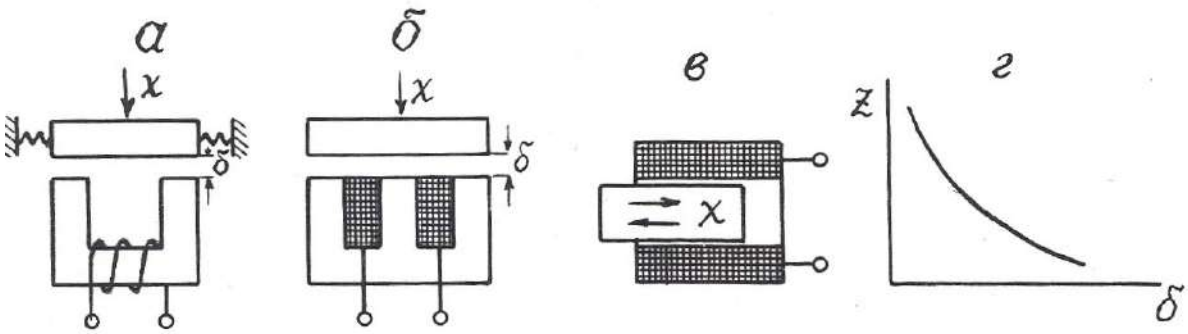


Рис. 2.10. Варианты выполнения индуктивных преобразователей с изменяемым воздушным зазором (*а-в*) и их статическая характеристика (*г*).

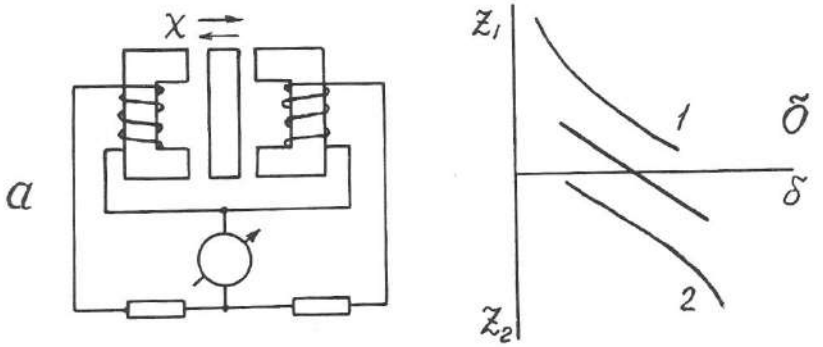


Рис. 2.11. Дифференциальный индуктивный преобразователь (а) и его статическая характеристика (б)

В геофизической аппаратуре индуктивные преобразователи находят применение в некоторых каверномерах и профилемерах (например, в профилемере ПМ-50) [2], в скважинных расходомерах ДАУ-3, РСИ-3 и ГЕО-В-600 (последний венгерского производства) [21], в индуктивных дефектомерах обсадных колонн.

2.2.2. Магнитоупругие преобразователи

Эти преобразователи основаны на взаимосвязи между магнитным и механическим состоянием ферромагнитных материалов.

Различают собственно **магнитоупругий эффект**, т.е. изменение магнитных свойств, в частности, магнитной проницаемости под воздействием механических деформаций, и обратное явление – **магнитострикционный эффект**, т.е. изменение формы и размеров ферромагнитных тел под воздействием внешнего магнитного поля.

В качестве материала для изготовления магнитоупругих датчиков используют сплавы: пермаллой, пермендюр, альсифер, ферриты, а также чистые металлы, например, никель. Конструкции преобразователей изображены на рис. 2.12.

Относительный коэффициент передачи магнитоупругого датчика $K_{отн}=(\Delta\mu/\mu)/(\Delta l/l)$ составляет около 200 и не остается постоянным при изменении размеров датчика (см. рис. 2.12, д).

Достоинства магнитоупругих датчиков: простота конструкции, прочность, удобство герметизации; недостатки: нелинейная статическая характеристика, наличие резонансной частоты.

Для стержневых датчиков (см. рис. 2.12, а, б) резонансная частота $f_0=V/2l$, где V – скорость упругих волн в материале сердечника, l – его длина; для кольцевого (см. рис. 2.12, в) – $f_0=V/2d$, где d – диаметр датчика.

Магнитоупругие преобразователи находят применение в аппаратуре акустического каротажа в качестве источников (магнито-стрикционные излучатели) упругих волн [12,17], в некоторых прихватоопределителях, а также в буровой технике – в измерителях нагрузки МКМ-2 буровых станков и в измерителях давления промывочной жидкости МИД-1, МИД-1А [5].

2.2.3. Магнитомодуляцнонные преобразователи

Эти преобразователи основаны на изменении магнитных свойств ферромагнитных материалов под действием магнитного поля.

Сердечники магнитомодуляционных преобразователей изготавливают в форме стержня с большим отношением длины l к диаметру d: $l/d>100$. При этом условии коэффициент размагничивания сердечника $N=0$ и даже в слабом магнитном поле, направленном вдоль его оси, сердечник намагничивается до насыщения. При этом его относительная магнитная проницаемость падает до 1, хотя при ненасыщенном состоянии она очень велика – до 10000. Для того, чтобы намагнитить сердечник до насыщения, на него наносят обмотку возбуждения, по которой пропускают переменный ток.

В моменты как падения магнитной проницаемости (при возрастании намагничивающего поля до H_s), так и восстановления ее (при уменьшении намагничивающего поля ниже H_s) в обмотке индуцируются пики э.д.с. самоиндукции противоположных знаков. Частота этих пиков вдвое превышает частоту возбуждающего тока, как это можно видеть по рис.2.13.

При воздействии на датчик внешнего постоянного магнитного поля, направленного вдоль его оси, в один из полупериодов это поле складывается с магнитным полем катушки возбуждения, и сердечник доходит до насыщения быстрее, чем вне внешнего магнитного поля, в другой полупериод внешнее поле вычитается из поля катушки возбуждения, и сердечник не доходит до

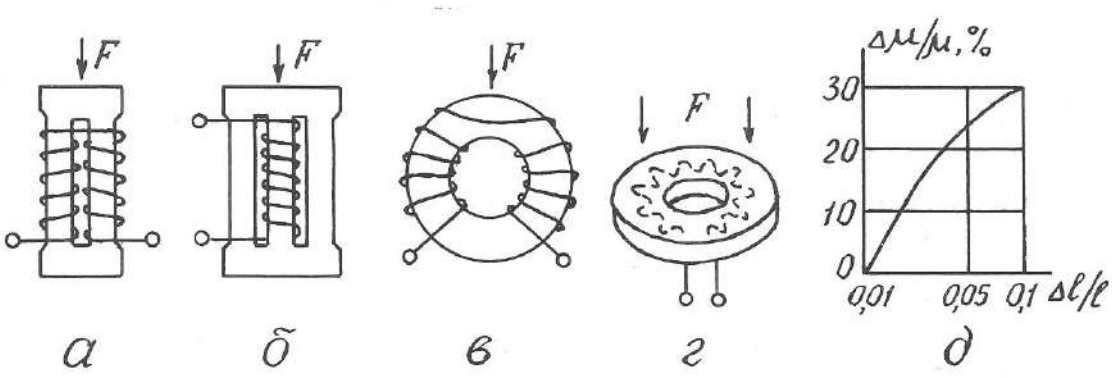


Рис. 2.12. Разновидности магнитоупругих преобразователей (а-г) и зависимость изменения магнитной проницаемости от изменения размеров преобразователя (д)

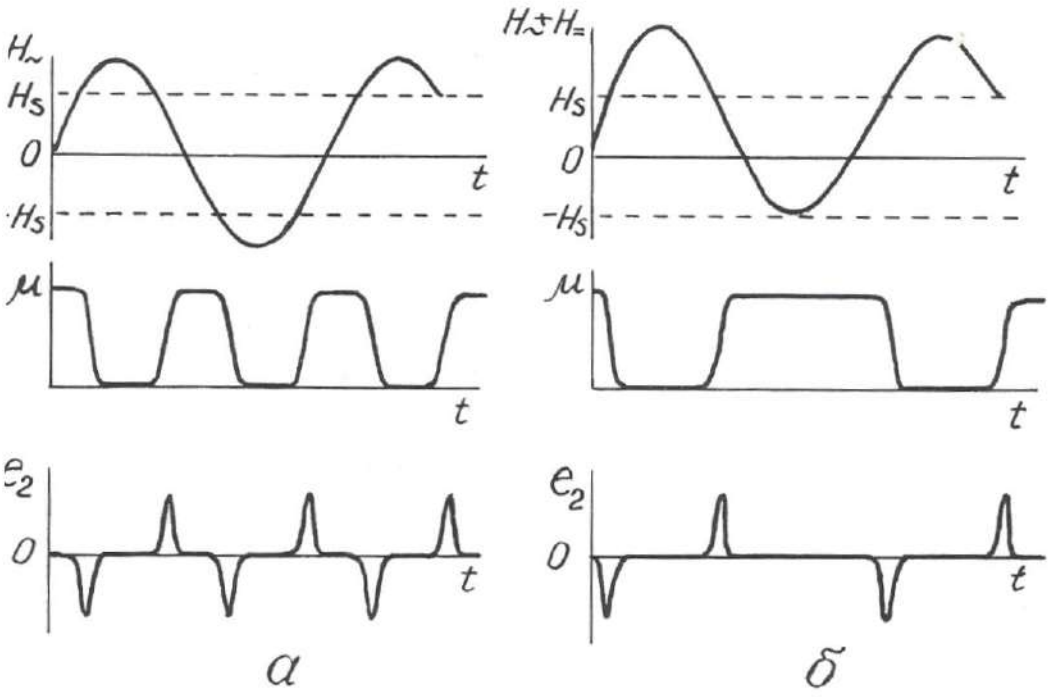


Рис. 2.13. Возникновение э.д.с. второй гармоники в магнитомодуляционном преобразователе в отсутствие (а) и при наличии (б) внешнего магнитного поля

магнитного насыщения, и нарушается симметрия перемагничивания сердечника.

Существуют 2-элементная и 1-элементная конструкции магнитомодуляционных датчиков (рис. 2.14). В 2-элементной имеются 2 параллельных сердечника, обмотки возбуждения на которых намотаны в противоположных направлениях и потому их магнитное поле имеет противоположное направление, а пики э.д.с. второй гармоники противоположны по знаку. По этой причине в сигнальной обмотке, охватывающей оба стержня, при отсутствии внешнего магнитного поля выходной сигнал равен 0. При наличии внешнего магнитного поля в один полупериод исчезает пара импульсов э.д.с. второй гармоники в одной обмотке, когда ее стержень не доходит до насыщения, в другой полупериод – не возникает такая же пара импульсов в другой обмотке возбуждения и потому на выходе сигнальной обмотки будет существовать э.д.с. второй гармоники, имеющая частоту, удвоенную по сравнению с током возбуждения. Амплитуда этой э.д.с. пропорциональна напряженности внешнего магнитного поля, а фаза определяется направлением последнего.

В одноэлементных датчиках э.д.с. второй гармоники выделяется не с помощью дополнительной сигнальной обмотки, а с помощью фильтров, настроенных на ее частоту.

Достоинства магнитомодуляционных датчиков: простота, надежность, отсутствие открытых электрических контактов, высокая чувствительность; недостаток – необходимость в сложной измерительной схеме, обеспечивающей питание датчика переменным током, а также выделение и усиление сигнала второй гармоники. Дополнительный недостаток 2-элементных датчиков – большое количество выводов.

Магнитомодуляционные преобразователи находят широкое применение в магнитометрической аппаратуре – 2-элементные в полевых (М-17) и аэромагнитометрах (АММ-13, АСГМ-46) [3], 1-элементные – в скважинных

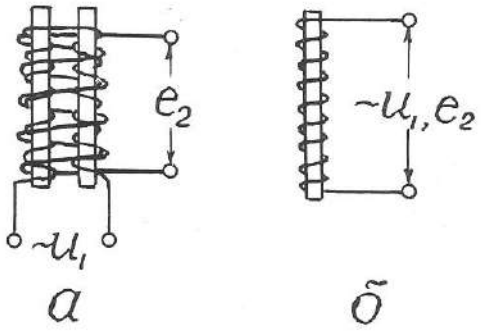


Рис. 2.14. Конструкция 2-элементного (а) и 1-элементного (б) магнитомодуляционного преобразователя

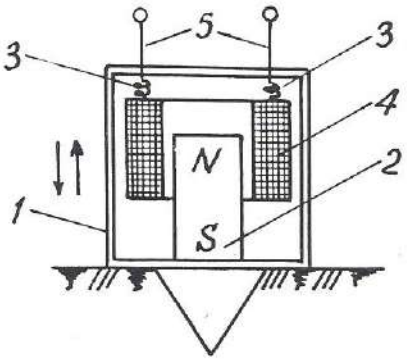


Рис. 3.1. Сейсмоприемник магнитоэлектрического типа: 1 – корпус; 2 – постоянный магнит; 3 – пружинки; 4 – катушка индуктивности; 5 – электрические выводы

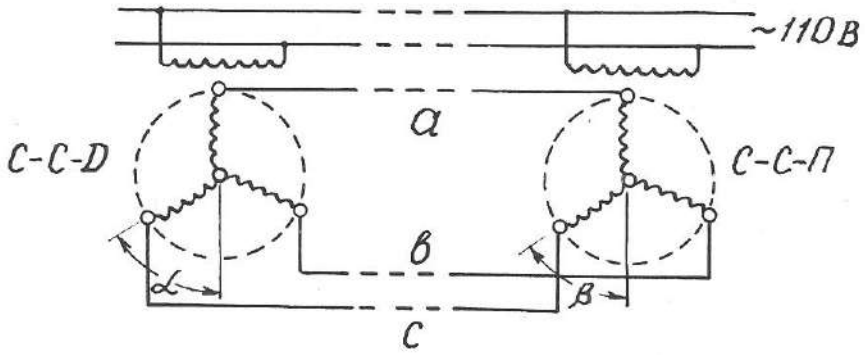


Рис. 3.2. Электрическая схема сельсинной передачи

магнитометрах ТСМ-3, ТСМК-40, ТСМК-30, КСМ-38 и др. [12,17]. Они используются также в скважинных расходомерах РЭТС-2 и магнитных меткоуловителях каротажных станций.

2.3. Емкостные преобразователи

Преобразователи этого вида основаны на изменении емкости C конденсатора под действием измеряемой величины.

Как известно, $C=\varepsilon S/\delta$ (2.2), где S – площадь обкладок конденсатора; δ – расстояние между ними; ε – диэлектрическая проницаемость среды между обкладками. Следовательно, изменять емкость можно путем воздействия измеряемой величины либо на геометрические размеры датчика, либо на его диэлектрическую проницаемость. При этом очевидно, что датчики с изменяемыми параметрами S и ε имеют линейную статическую характеристику, а датчики с изменяемой величиной δ – нелинейную. В последнем случае для линеаризации характеристики возможно применение дифференциальных емкостных преобразователей, аналогичных по конструкции дифференциальным индуктивным датчикам.

Входными величинами емкостных датчиков могут быть линейные и угловые перемещения, механические усилия, деформации, изменение состава вещества.

Достоинства емкостных датчиков: высокая чувствительность, безинерционность, стабильность; недостаток – малая выходная мощность.

Датчики этого вида используются в аппаратуре диэлектрического каротажа ДК-1.Чувствительный элемент этой аппаратуры представляет собой цилиндрический конденсатор больших размеров, емкость которого зависит от диэлектрической проницаемости окружающих горных пород [2].

В так называемых «аквамерах» – приборах для определения количества воды в смесях «вода-нефть», откачиваемых из буровых скважин, также

применяется емкостной датчик. Действие этого прибора основано на том, что у воды ε=81, а у нефти ε=2,5 отн.ед. (при температуре 18^0 С)

В некоторых скважинных термометрах используются в качестве частотозадающего элемента в схеме *RC*-генератора конденсаторы, емкость которых зависит от температуры.

Кроме того, известны скважинные емкостные измерители зенитного угла [25]. Их чувствительный элемент – конденсатор, одна обкладка которого представляет собой металлическую изолированную полусферу, установленную перпендикулярно оси прибора, а другая обкладка – залитую в эту сферу ртуть. При вертикальном расположении датчика емкость его максимальна, при наклоне – уменьшается.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные характеристики контактных преобразователей и приведите примеры их применения в геофизической аппаратуре (ГА).

2. Назовите основные характеристики реостатных преобразователей, приведите примеры их применения в ГА.

3. Назовите основные характеристики тензометрических преобразователей и приведите примеры их применения.

4.Назовите основные характеристики электролитических преобразователей и приведите примеры их применения в ГА.

5. Назовите основные характеристики терморезистивных преобразователей и приведите примеры их применения в ГА.

6. Назовите разновидности и основные характеристики фоторезистивных преобразователей, приведите примеры применения их в ГА.

7. Назовите разновидности индуктивных преобразователей.

8. Поясните принцип действия индуктивных преобразователей с изменяемым воздушным зазором, приведите примеры их применения в ГА.

9. Поясните принцип действия магнитоупругих преобразователей, приведите примеры их применения в ГА.

10. Поясните принцип действия магнитомодуляционных преобразователей, приведите примеры их применения.

11. Назовите основные характеристики емкостных преобразователей и приведите примеры их применения.

3.ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ГЕНЕРАТОРНОГО ТИПА

Во всех генераторных преобразователях выходной величиной является э.д.с., появляющаяся в результате воздействия измеряемой величины.

3.1. Преобразователи индукционной э.д.с.

Эти преобразователи основаны на явлении электромагнитной индукции, возникающей при воздействии на проводник переменного магнитного поля.

Изменение магнитного поля, воздействующего на проводник или, точнее, на катушку индуктивности, достигается либо за счет перемещения катушки относительно постоянного магнита, либо за счет изменения магнитного поля при неизменном расположении магнита и катушки индуктивности.

3.1.1 Преобразователи индукционной э.д.с, со взаимным перемещением магнита и катушки индуктивности

Э.д.с., возникающая в катушке индуктивности, зависит от следующих факторов: $e=BVlW\mathrm{Sin}\alpha$, где B – магнитная индукция; V – относительная скорость перемещения; α – угол между векторами V и B, l – длина витка и W – число витков в катушке.

Преобразователи этого вида широко используются в геофизической аппаратуре. Примером могут служить сейсмоприемники магнито-электрического типа (С210, СВ1-30 и др.), принцип действия которых

иллюстрируется рис. 3.1 [3]. С корпусом приемника 1 жестко скреплен постоянный магнит 2. Над магнитом на пружинках 3 подвешена катушка индуктивности 4 с электрическими выводами 5. При колебаниях поверхности, на которой установлен сейсмоприемник, происходят взаимные перемещения магнита 2 и катушки индуктивности 4, и в последней наводится э.д.с.

Другой пример использования датчиков этого вида – автосинная (или сельсинная) передача, которая применяется в каротажных станциях для синхронизации движения носителя записи (диаграммной или магнитной ленты) с перемещением, зонда по скважине [12]. Принципиальная схема сельсинной передачи представлена на рис. 3.2. Передача содержит, по меньшей мере, две идентичных электрических машины, у которых статор имеет однофазную обмотку с явно выраженными полюсами, а ротор – трехфазную обмотку с неявно выраженными полюсами. Одна машина, называемая сельсином-датчиком (ССД), устанавливается на блок-балансе, через который в скважину опускается кабель со скважинным снарядом. При движении кабеля по скважине блок-баланс через зубчатую передачу приводит во вращение ротор сельсина-датчика. Другая машина, называемая сельсином-приемником (ССП), устанавливается в регистрирующем приборе каротажной станции и играет роль привода его лентопротяжного механизма. Обмотки роторов ССД и ССП включены навстречу друг другу, а обмотки статоров питаются переменным током промышленной частоты от одного и того же источника. Переменный ток создает в обмотках статоров пульсирующие магнитные потоки, которые индуцируют в роторных обмотках э.д.с., зависящие от угла поворота ротора относительно статора. Если эти углы у роторов ССД и ССП одинаковы ($\alpha=\beta$), то э.д.с., в их обмотках равны и взаимно компенсируют друг друга. Токи в каждой роторной цепи равны нулю. Если эти углы не равны ($\alpha\neq\beta$), баланс э.д.с. нарушается, и в роторных обмотках возникают токи, которые создают в них магнитные поля, стремящиеся повернуть роторы до положения $\alpha=\beta$.Поскольку ротор ССД механически связан с роликом блок-баланса, находящегося под

большой нагрузкой, то поворачивается все время ротор ССП, нагрузка на который меньше и который перемещает носитель записи синхронно с движением скважинного прибора. С одним и тем же ССД могут быть соединены несколько ССП, например, один в регистрирующем приборе, другой на панели лебедчика в блоке счетчика глубин.

Еще один пример применения датчиков этого вида – тахогенераторы – приборы для измерения скорости вращения [5]. В этих приборах ротор генератора вращается в поле постоянного магнита или электромагнита, а индуцируемая в нем э.д.с. выпрямляется и измеряется стрелочным или цифровым прибором. Такие тахогенераторы также используются в каротажных станциях для измерения скорости движения скважинного снаряда. Приводом ротора тахогенератора служит один из сельсинов-приемников автосинной передачи.

3.1.2. Преобразователи индукционной э.д.с. со стационарным размещением магнита и катушки индуктивности

В преобразователях этого вида изменение магнитного поля достигается за счет перемещения ферромагнитных масс в воздушном зазоре между магнитом и катушкой индуктивности. В общем случае э.д.с. индукции пропорциональна скорости изменения магнитного потока Ф и числу витков в катушке:

$e=-wd\Phi/dt.$

На рис. 3.3 представлено несколько примеров применения преобразователей этого вида в геофизической аппаратуре.

В скважинном каппаметре Н. А. Иванова (рис. 3.3, а) датчик представляет собой катушку индуктивности с большим количеством витков, намотанную на постоянном стержневом магните. Когда такой датчик перемещается по стволу скважины мимо горных пород с повышенными магнитными свойствами, это вызывает изменение магнитного потока через катушку индуктивности, и в ней

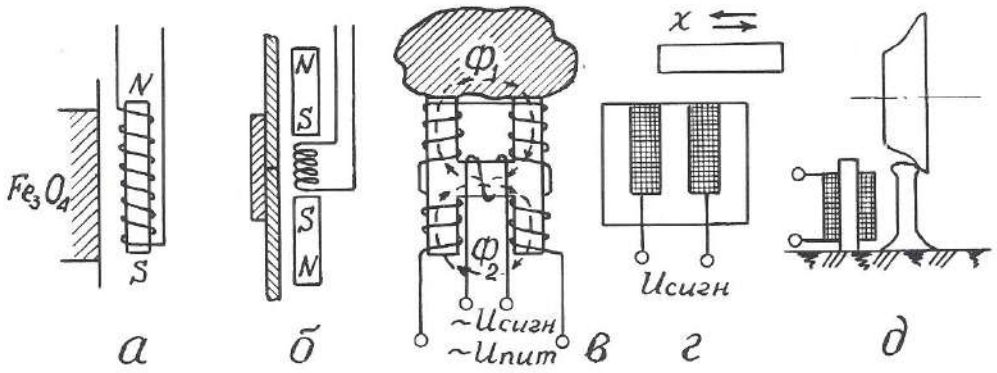


Рис. 3.3. Примеры применения преобразователей индукционной э.д.с.: а – скважинный каппаметр Н. А. Иванова; б – локатор муфт; в – лабораторный измеритель магнитной восприимчивости; г – счетчик количества; д – счетчик вагонеток

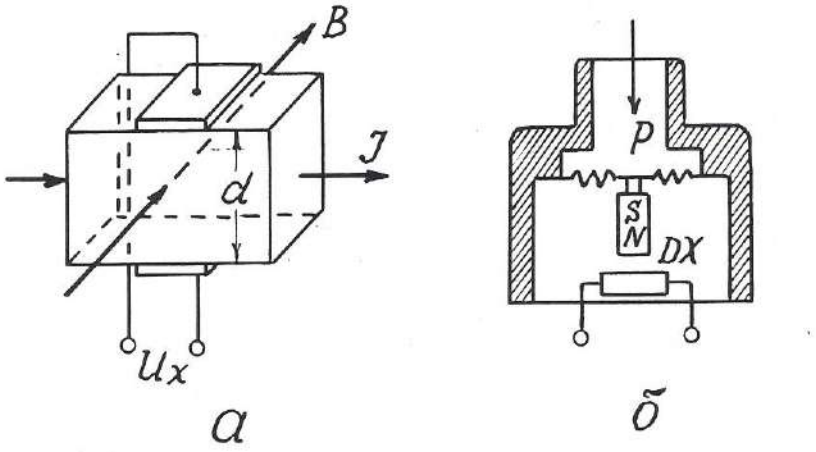


Рис. 3.4. Принцип действия преобразователя Холла (а) и его применение в манометре мембранного типа (б)

возникает э.д.с., пропорциональная магнитной восприимчивости горных пород. В наземном измерительном пульте эта э.д.с., усиливается, выпрямляется и выводится на регистрирующий прибор.

В 50-60 годах каппаметры Н. А. Иванова успешно применялись для исследования скважин на железорудных месторождениях Урала, но потом были заменены более совершенными приборами, поскольку описанный датчик имеет один явный недостаток – сигнал на его выходе зависит не только от магнитных свойств среды, но и от скорости перемещения датчика.

До настоящего времени при исследованиях обсаженных скважин применяются так называемые «локаторы муфт» – приборы, предназначенные для определения положения соединительных муфт обсадных колонн в скважинах [17].

Локатор муфт (рис. 3.3, б) содержит катушку индуктивности и два идентичных постоянных магнита, размещенных выше и ниже нее навстречу друг другу одноименными полюсами. Когда такой прибор перемещается по стальной трубе, имеющей постоянную толщину стенок, магнитные потоки верхнего и нижнего магнитов равны и в области расположения катушки индуктивности компенсируют друг друга. Когда же прибор проходит через соединительную муфту, то из-за увеличения толщины стали сначала усиливается магнитный поток одного (верхнего), а затем другого (нижнего) магнита. В результате в катушке возникает пара разнополярных импульсов э.д.с., которые и регистрируются на диаграммной ленте.

Еще один пример применения преобразователей данного вида – измерители магнитной восприимчивости образцов горных пород (прибор ИМВ-2) [3]. Датчик измерителя (рис. 3.3, в) представляет собой «Н» – образный сердечник с четырьмя обмотками возбуждения на концах сердечника и одной измерительной обмоткой на его «перекладине». Обмотки возбуждения подключены к источнику переменного тока и соединены таким обрезом, чтобы магнитные потоки, создаваемые ими в «перекладине» сердечника, были

направлены навстречу друг другу. Когда датчик находится в воздухе, эти потоки взаимно компенсируются, и сигнал в измерительной обмотке равен нулю. Когда к рабочей поверхности датчика прикладывается образец с повышенной магнитной восприимчивостью, магнитный поток, проходящий через него, увеличивается, и в измерительной обмотке наводится э.д.с., которая затем усиливается и измеряется.

Датчики данного вида находят также применение в технике как счетчики металлических предметов (рис. 3.3, г), счетчики вагонеток (рис. 3.3, д) и т.п. [5].

Общими достоинствами преобразователей индукционной э.д.с. является большая мощность выходного сигнала и отсутствие открытых электрических контактов, недостатком – наличие электромагнитного взаимодействия между магнитом и катушкой индуктивности.

3.2. Преобразователя гальваномагнитной э.д.с.

3.2.1. Преобразователи Холла

Преобразователи этого вида основаны на эффекте Холла, наблюдаемом в полупроводниках. Этот эффект проявляется в возникновении разности потенциалов U_x на обкладках датчика, по которому протекает ток I, при помещении его в магнитное поле, направленное перпендикулярно току. Принцип действия преобразователя Холла поясняется рис. 3.4.

$U_x=K_x \cdot IB/d$, где B – магнитная индукция; d – толщина датчика; K_x – коэффициент Холла, зависящий от характеристики материала и размеров датчика. Эффект Холла наблюдается в таких полупроводниковых материалах, как антимонид индия (InSb), арсенид индия (InAs), арсенид галлия (GaAs), арсенид-фосфат индия ($InAs_{0,8}P_{0,2}$) и др. Чистые полупроводники германий и кремний имеют очень высокое значение коэффициента Холла, но весьма чувствительны к режиму работы.

Датчики Холла используются для измерения перемещений, давления, числа оборотов и скорости вращения.

Достоинство датчиков: высокая чувствительность; недостатки: потребность во внешнем источнике питания, высокое выходное сопротивление и необходимость в высоком внутреннем сопротивлении источника питания, наличие четырех выводов.

В геофизической аппаратуре датчики Холла могут быть использованы для улавливания магнитных меток на каротажном кабеле (патент США № 4709208) или для измерения давления (рис. 3.4, б).

Отечественная приборостроительная промышленность выпускает микросхемы серии К1116 с датчиками Холла для магнитного управления электрическими цепями [16].

3.2.2. Преобразователи Виганда

Магнитобистабильный преобразователь Виганда состоит из специально обработанной проволоки из сплава викаллой (ванадий-10%, кобальт-52%, железо-38%) небольшого диаметра (около 0,3 мм), на которую нанесена обмотка индуктивности (рис. 3.5). При помещении датчика в магнитное поле в момент превышения напряженностью поля определенного порога направление намагниченности сердечника катушки спонтанно меняется, и в катушке возникает импульс напряжения длительностью около 20 мкс. При длине датчика 15 мм и числе витков w=1300 выходное напряжение достигает 2,5 В [6].

Достоинства датчиков Виганда: большой выходной сигнал, отсутствие внешнего питания, широкий температурный диапазон (от - 196 до + 175° С), искробезопасность.

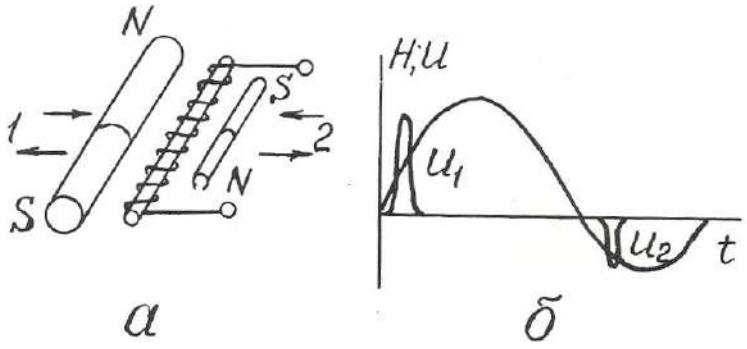


Рис. 3.5. Устройство преобразователя Виганда (а) и осциллограмма его выходного сигнала (б)

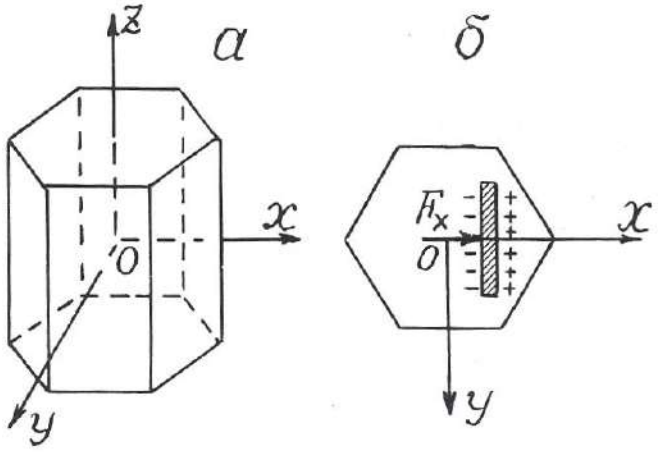


Рис. 3.6. Основные оси кристалла кварца (а) и возникновение пьезоэ.д.с. на кварцевой пластине (б)

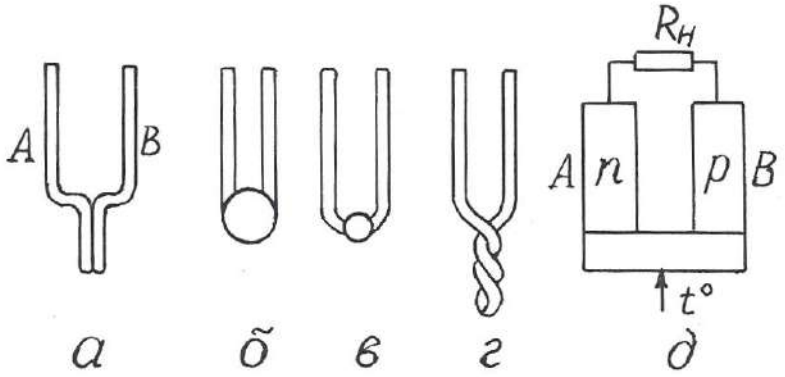


Рис. 3.7. Преобразователи термоэ.д.с. металлические (а-г) и полупроводниковые (д)

Ввиду того, что датчики Виганда были разработаны сравнительно недавно, в конце 80-х годов, они пока еще не используются в геофизической аппаратуре, хотя и могли бы найти применение, например, в магнитных меткоуловителях, устройствах блокировки, каротажных станций и других приборах.

3.3. Преобразователи пьезоэ.д.с.

Действие пьезопреобразователей основано на пьезоэлектрическом эффекте, который возникает в результате взаимосвязи между механическим и электрическим состоянием некоторых диэлектрических материалов, называемых **пьезоэлектриками**.

Различают **прямой пьезоэффект**, заключающийся в возникновении электрических зарядов на гранях кристаллов пьезоэлектриков под действием механических напряжений и исчезновении их после снятия нагрузки, и **обратный пьезоэффект**, проявляющийся в изменении формы и размеров пьезоэлектриков под действием электрического поля.

Способность к пьезоэффекту характеризуется пьезоэлектрической постоянной (пьезомодулем), величина которой определяется электрическим зарядом в Кл, возникающим вод действием внешней силы в 1 Н: $K_{пэ}=Q/F$.

Наиболее сильно пьезоэффект выражен у сегнетоэлектриков – веществ с аномально высокой диалектрической проницаемостью. К ним относиться сегнетовая соль, кварц, турмалин, титанат бария и некоторые другие вещества.

Самая высокая пьезоэлектрическая постоянная у сегнетовой соли ($C_4H_4O_6KNa$): $K_{пэ}=300\cdot10^{-12}$ Кл/Н; у титана бария ($BaTiO_3$) $K_{пэ}= 100\cdot10^{-12}$ Кл/Н; у кварца $K_{пэ}=2{,}1\cdot10^{-12}$ Кл/Н.

Основные свойства пьезоэлектрических датчиков рассмотрим на примере кварца. Кристалл кварц имеет главную оптическую ось *z*, нейтральную или механическую ось *y*, и электрическую ось *x* (рис.3.6). Максимальный пьезоэффект наблюдается при воздействии механических нагрузок вдоль

электрической оси *x*, поэтому пластины для пьезопреобразователей вырезают из кристаллов кварца перпендикулярно оси *x*.

Возникновение пьезоэффекта объясняется тем, что под действием механических сил происходит смещение электрических зарядов – одна область кристалла заряжается положительно, другая – отрицательно.

Достоинства преобразователей этого вида: безынерционность, линейная статическая характеристика, высокая собственная частота, малые габариты; недостатки: утечка зарядов с течением времени, необходимость гидроизоляции.

Применяются пьезопреобразователи для измерения динамических нагрузок, деформаций, перемещений.

В геофизической аппаратуре пьезопреобразователи используются в качестве приемников упругих колебаний в скважинных приборах акустического каротажа (СПАК-2, СПАК-4, СПАК-6 и др.). Такой пьезоэлектрический сейсмоприемник изготавливается в виде полой сферы из пьезокерамики, внутренняя и внешняя поверхности которой имеют серебряное покрытие для облегчения снятия с них электрических зарядов. От промывочной жидкости в скважине сейсмоприемник отделен слоем резины [2,17].

В полевой геофизике существует сейсмоэлектрический метод разведки, который заключается в возбуждении с помощью взрыва пьезоэффекта на кристаллах естественных пьезоэлектриков в условиях их коренного залегания и в измерении этого эффекта с помощью системы электродов [3].

В быту пьезопреобразователи используются в качестве звукоснимателей в электропроигрывателях, в зажигалках для газовых плит (прямой пьезоэффект), в звукоизлучателях электронных часов и ПЭВМ (обратный пьезоэффект) [22].

3.4. Преобразователи термоэ.д.с.

Преобразователи этого вида основаны на термоэлектрическом эффекте, заключающемся в том, что в цепи из двух разнородных проводников при

поддержании разных температур в точках их соединения возникает э.д.с., пропорциональная разнице этих температур (эффект Зеебека) [22].

Термоэлектрические преобразователи называют термопарами а проводники А и В, из которых они состоят – термоэлементами (рис. 3.7).

Один **чувствительный спай** термоэлементов подвергают воздействию измеряемой температуры, температуру другого, **опорного**, поддерживают постоянной.

Чувствительность термопреобразователей составляет от 5 до 60 мкВ/К.

Наибольшую чувствительность имеют термопары, составленные из двух полупроводников с различной (электронной и дырочной) природой проводимости.

Достоинства термопреобразователей: отсутствие источников питания, линейная статическая характеристика, большой диапазон измеряемых температур; недостаток: малая мощность сигнала отдельной термопары.

В геофизике используются металлические термопреобразователи в качестве термометров для исследования скважин на месторождениях парогидротерм, полупроводниковые – в качестве датчиков в полевой терморазведке.

В технике термопары используются в системах автоматического регулирования температуры в различных металлургических процессах. В годы Великой Отечественной войны выпускались батареи полупроводниковых термопреобразователей, которые надевались на стекло керосиновой лампы и вырабатывали электроэнергию, достаточную для питания лампового приемника или рации.

3.5. Преобразователи фотоэ.д.с.

В этих преобразователях используются два полупроводника с разным характером проводимости (рис. 3.8, а). На их контакте происходит взаимная

диффузия электронов в *p*-полупроводник, дырок – в *n*-полупроводник. Дырки рекомбинируют с электронами, в результате на контакте полупроводников образуется тонкий запирающий слой – «*p*-*n*-переход». Такие преобразователи могут работать в режиме источника тока и фотодиода.

При отсутствии светового облучения через такой преобразователь проходит очень небольшой, так называемый «темновой ток», соответствующий обратному току диода. При световом облучении *p*-*n* -перехода кванты света образуют добавочные носители тока.

Под действием разности потенциалов потенциального барьера *p*-*n*-перехода электроны перемещаются в зону *n*-полупроводника, а дырки – в зону *p*-полупроводника, создавая фотоэ.д.с., на выводах прибора. На рис. 3.8, а электроны и дырки, прошедшие через *p*-*n*-переход в результате диффузии и создавшие потенциальный барьер *p*-*n*-перехода, условно обозначены как «+» и «-» без кружочков. Добавочные дырки и электроны, возникшие под действием облучения, показаны как «+» и «-» в кружочках. Стрелками показано направление действующих на них сил поля *p*-*n*-перехода.

На рис. 3.8, б показан разрез германиевого фотодиода, состоящего из пластины германия 1 с проводимостью *n*-типа, которая сплавлена с индием 2 (проводимость *p*-типа). Толщина слоя германия над индием настолько мала, что кванты света свободно проникают через него в зону *p*-*n*-перехода. Корпус 3 выполнен из оргстекла и залит компаундом 4.

Спектральные характеристики фотопреобразователей зависят от используемых в них материалов.

Интегральная чувствительность германиевых фотопреобразователей имеет наибольшее значение $K_{диф}=\Delta I/\Delta Ф=20$ мА/лм. Э.д.с. фотогенераторов не превышает 0,12-0,5 В.

Преобразователи фотоэ.д.с. изготавливаются из кремния, селена, сернистого таллия и сернистого серебра. Достоинством селеновых фотопреобра-

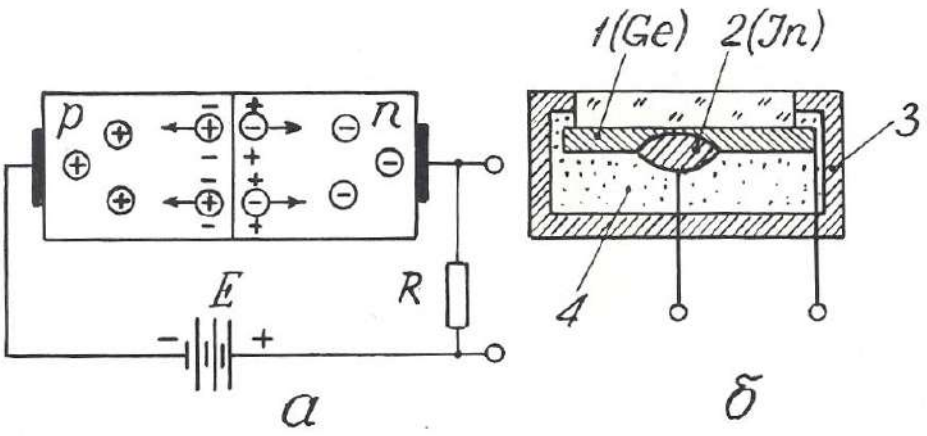


Рис. 3.8. Преобразователь фотоэ.д.с.: принцип действия (а) и конструкция (б)

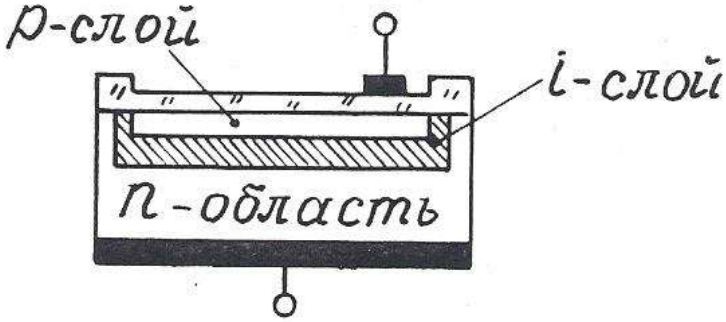


Рис. 3.9. Структура *pin*-диода

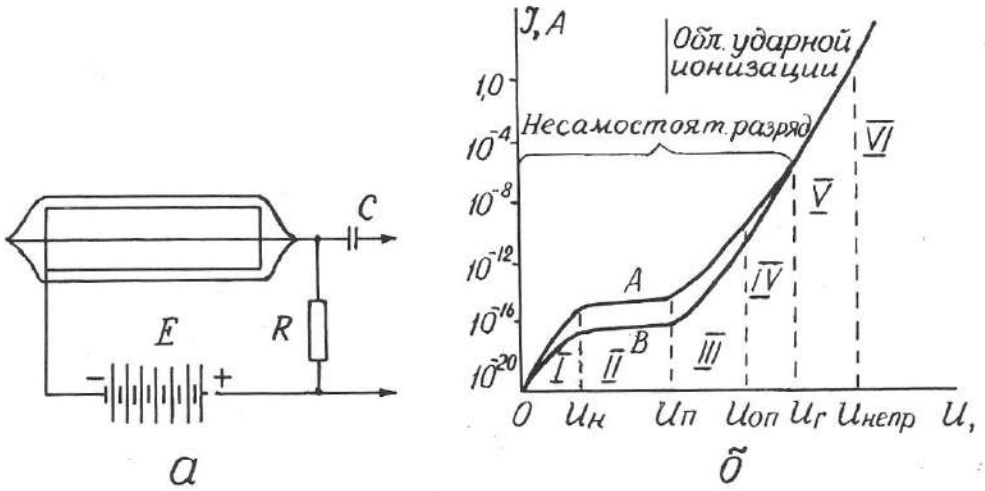


Рис. 4.1. Устройство газоразрядного счетчика (а) и его вольт-амперная характеристика (б):
А – β-частица; В – γ-квант

зователей является их спектральная чувствительность, близкая к чувствительности человеческого глаза.

Для увеличения количества дополнительных носителей, образующихся в *p*-*n*-переходе под действием светового облучения, между *p* и *n*-полупроводниками располагают дополнительный слой нелегированного высокоомного кремния (*i*-слой) – рис. 3.9. Такие фотоэлектрические приборы носят название *pin*-диодов. Область применения их в геофизической аппаратуре та же, что и фоторезистивных датчиков (см. раздел 2.1.7).

Контрольные вопросы

1. Назовите основные характеристики преобразователей индукционной э.д.с., их разновидности и приведите примеры их применения в технике и геофизической аппаратуре (ГА).

2. Поясните принцип действия датчика Холла и объясните его устройство (рис. 3.4, а).

3. Поясните принцип действия и устройство датчика Виганда (рис. 3.5).

4. Поясните принцип действия преобразователей пъезоэ.д.с. и приведите примеры их применения в ГА.

5. Поясните принцип действия преобразователей термоэ.д.с. и приведите примеры их применения в технике и ГА.

6. Поясните принцип действия преобразователей фотоэ.д.с. и приведите примеры их применения.

4. РАДИАЦИОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

В настоящем пособии будут рассмотрены только те радиационные преобразователи, которые преобразуют энергию ядерного излучения в электрический сигнал. Эти преобразователи называются также детекторами радиоактивных излучений. Они бывают трех видов: газоразрядные, сцинтилляционные и полупроводниковые.

4.1. Газоразрядные детекторы

В газоразрядном детекторе происходит непосредственное преобразование энергии радиоактивного излучения в электрические импульсы.

Газоразрядный детектор представляет собой металлический цилиндр, по оси которого натянута тонкая металлическая нить. Цилиндр играет роль катода и подключается к «минусу» источника постоянного напряжения, нить (анод) – к «плюсу». И нить, и цилиндр могут быть помещены в стеклянный баллон (рис. 4.1, а). Полость детектора заполнена газом под низким давлением (примерно – $1{,}5 \cdot 10^4$ Па). При прохождении через детектор нейтроны и гамма-кванты взаимодействуют с атомами вещества его катода и газового наполнителя, вызывая ионизацию газа и, как следствие, прохождение кратковременного импульса тока, сила I которого зависит от напряжения U между электродами. При схеме включения детектора, изображенной на рис. 4.1, а, на нагрузочном сопротивлении R импульс тока создает отрицательный импульс напряжения, который через разделительный конденсатор C подается на усилительно-регистрирующую схему [13].

Зависимость $I=f(U)$ или вольт-амперная характеристика счетчика приведена на рис. 4.1, б. В ней выделяются шесть областей, отличающихся по механизму переноса ионов в электрическом поле счетчика. В области I при малых напряжениях на электродах ток возрастает пропорционально напряжению, т.к. с ростом напряжения уменьшается количество рекомбинирующихся ионов и все большее их количество достигает электродов счетчика. Эта область (от 0 до $U_н$) называется **омической**. Начиная с некоторого значения $U_н$, ток достигает насыщения (все ионы долетают до анода и катода) и перестает возрастать. Величина ионизационного тока во II области (от $U_н$ до $U_п$) определяется только количеством ионов, образующихся в единицу времени. Преобразователи, работающие в этой области, носят название **ионизационных камер**. При дальнейшем, свыше $U_п$ росте напряжения, несмотря на постоянство

начальной ионизации, происходит рост тока в импульсе. Это связано с возникновением ударной ионизации, при которой электроны, образующиеся при первоначальном воздействии радиации, ускоряются электрическим полем счетчика настолько, что начинают ионизировать молекулы газового наполнителя. Отношение числа ионов, достигших анода счетчика, к числу первичных ионов, созданных регистрируемой частицей (или гамма-квантом), называется **коэффициентом газового усиления**. Величина его зависит от приложенного напряжения.

С возникновением ударной ионизации вначале ток возрастает пропорционально напряжению на электродах (область пропорциональности III от $U_{\text{п}}$ до $U_{\text{оп}}$), здесь отмечается относительно невысокий коэффициент газового усиления (до 10^4), а при дальнейшем увеличении U пропорциональность нарушается и от $U_{\text{оп}}$ до $U_{\text{г}}$ следует IV область – **ограниченной пропорциональности**. За ней идет область Гейгера (V), в которой амплитуда импульса не зависит от начальной ионизации. Коэффициент газового усиления достигает 10^8-10^9 и продолжает увеличиваться с ростом напряжения. За областью Гейгера следует область **непрерывного разряда** (VI), для возникновения которого не нужна первичная ионизация, достаточно к электродам счетчика приложить напряжение, превышающее $U_{\text{непр}}$.

Области V и VI – это области самостоятельного разряда, который не требует для своего поддержания внешних источников ионизации.

Газоразрядные детекторы, применяемые в геофизической аппаратуре, работают либо в пропорциональной области (пропорциональные счетчики), либо в области Гейгера (счетчики Гейгера-Мюллера).

Пропорциональные счетчики используются для измерения плотности потока тепловых нейтронов. Баллон счетчика заполняется трехфтористым бором (BF_3), обогащенным до 96 % изотопом B-10, имеющим большое сечение захвата тепловых нейтронов. При захвате нейтрона происходит реакция B (n,α) Li, α – частица производит первичную ионизацию в объеме счетчика. Для

измерений нейтронов надтепловых энергий счетчик окружают сначала слоем водородсодержащего вещества, например, парафина, а затем тонким (около 0,5 мм) слоем кадмия. Кадмий поглощает тепловые нейтроны, а надтепловые в парафине замедляются до тепловых энергий и затем фиксируются счетчиком.

Счетчик Гейгера-Мюллера применяется для регистрации гамма-квантов. Он заполняется инертным газом (аргоном или гелием) с добавкой паров высокомолекулярных органических соединений (этилового спирта или этилового эфира) или галогенов (хлора, брома). Такая добавка способствует гашению непрерывного разряда, т.к, положительные ионы, образовавшиеся из молекул инертного газа, нейтрализуются при столкновениях с молекулами высокомолекулярного соединения или галогена и не вызывают вторичной электронной эмиссии с катода.

После регистрации каждой ионизирующей частицы газоразрядный счетчик не способен в течение некоторого «мертвого времени» $\tau_м$ (порядка 10^{-4} с) отмечать попадание следующей частицы или реагирует на нее образованием импульса пониженной амплитуды («время восстановления» – $\tau_в$). Величина «мертвого времени» и «времени восстановления» определяет разрешающую способность и эффективность преобразователя.

Разрешающей способностью преобразователя называют максимальное количество ионизирующих частиц N_{max}, которые могут быть уверенно зафиксированы преобразователем $N_{max}=I/(\tau_м+\tau_в)$.

Под **эффективностью счетчика** понимают отношение числа частиц, зарегистрированных счетчиком, к общему числу частиц, прошедших через объем счетчика. Эффективность газоразрядных счетчиков зависит от их конструкции, размеров и материала катода и обычно не превышает нескольких процентов.

Основной рабочей характеристикой газоразрядного преобразователя является его **счетная характеристика** – зависимость числа импульсов на его выходе от напряжения на электродах при постоянной интенсивности

ионизирующего облучения (рис. 4.2). Участок *ав* в пределах которого выбирается рабочее напряжение счетчика $U_{раб}$, называется **плато**. Протяженность плато составляет от 200 до 300 В, а наклон – от 3 до 15 % на 100 В.

Достоинства газоразрядных детекторов: большая амплитуда сигнала, малая потребляемая мощность, широкий температурный диапазон; недостатки: потребность в источнике питания с высоким напряжением, ограниченный ресурс, для счетчиков Гейгера-Мюллера – независимость амплитуды выходного сигнала от энергии ионизирующего излучения.

Газоразрядные счетчики очень широко применялись во всех разновидностях геофизических радиометров: полевых, каротажных, автомобильных и самолетных [3,12]. В последнее время они в значительной мере вытеснены более эффективными сцинтилляционными детекторами.

4.2 Сцинтилляционные детекторы

Сцинтилляционный радиационный преобразователь (рис. 4.3) состоит из люминофора 1 (оптически прозрачного вещества, люминесцирущего под действием ядерного излучения), и фотоэлектронного умножителя 2 (ФЭУ).

В результате действия попавшей в сцинтиллятор элементарной частицы (или гамма-кванта) часть атомов сцинтиллятора переходит в возбужденное состояние. Обратный переход их в нормальное состояние сопровождается кратковременной (порядка 10^{-7}-10^{-9}с) световой вспышкой. Фотоны света преобразуются в электрический сигнал с помощью ФЭУ, который представляет собой комбинацию фотоэлемента с электронным усилителем. Фотоны из сцинтиллятора 1 выбивают из фотокатода ФЭУ 3 электроны, которые под действием электрического поля устремляются к ближнему диноду 4, имеющему положительный потенциал. Вследствие вторичной электронной

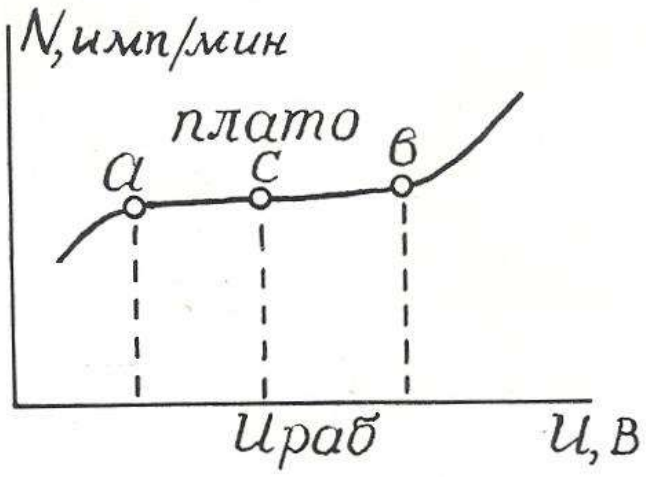


Рис. 4.2. Счетная характеристика газоразрядного счетчика Гейгера – Мюллера

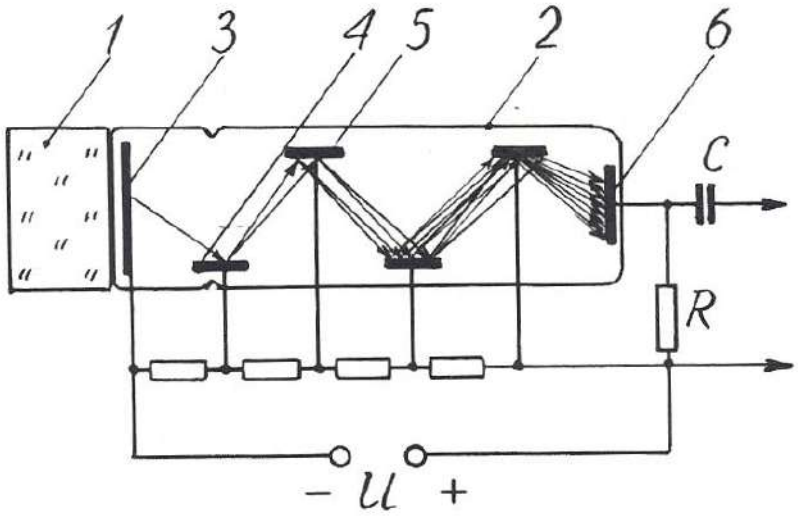


Рис. 4.3. Устройство сцинтилляционного преобразователя: 1 – кристалл-сцинтиллятор; 2 – фотоэлектронный умножитель (ФЭУ); 3 – фотокатод; 4 – первый динод; 5 – второй динод; 6 – анод (ФЭУ)

эмиссии каждый электрон "выбивает из динода вторичные электроны, которые притягиваются следующим динодом 5, имеющим более высокий потенциал, и также вызывают вторичную электронную эмиссию. Процесс развивается лавинообразно, в результате попаданию каждой ионизирующей частицы в кристалл-сцинтиллятор соответствует прохождение импульса тока между анодом 6 и катодом 1 ФЭУ, причем амплитуда этого импульса пропорциональна энергии ионизирующей частицы.

Эффективность сцинтилляционных детекторов намного выше, чем у газоразрядных, и достигает 20 %.

В качестве сцинтилляторов для регистрации гамма-квантов в геофизический аппаратуре используют монокристаллы соединений NaI, CsI, KI, активированных таллием (Tl), а для регистрации нейтронов – кристаллы сернистого цинка ZnS с добавками серебра или меди. Примесь активатора (Tl, Ag, Cu) в люминофоре способствует созданию в решетках кристаллов-сцинтилляторов дополнительных центров люминесценции [13].

Счетная характеристика сцинтилляционных преобразователей имеет плато очень небольшой протяженности, вследствие чего эти преобразователи требуют питания высокостабилизированным напряжением.

Преимущества сцинтилляционных преобразователей перед газоразрядными: высокая эффективность, большая разрешающая способность, зависимость амплитуды выходного сигнала от энергии ионизирующего излучения, что позволяет изучать энергетический спектр последнего.

Эти преимущества обеспечивают широкое распространение детекторов этого вида в разнообразных радиометрах: полевых (СРП-68-02), скважинных (ДРСТ-3, Кура-2м и др.), самолетных (АСГМ-46 и др.).

К недостаткам сцинтилляционных детекторов можно отнести низкую термостойкость и термостабильность, что требует их термостатирования в скважинных радиометрах [9].

4.3. Полупроводниковые детекторы

Полупроводниковые детекторы (ППД) устроены и действуют совершенно аналогично преобразователям фотоэ.д.с., рассмотренным в разделе 3.5. Отличие заключается только в том, что в ППД образование свободных носителей в зоне *p*-*n*-перехода происходит за счет действия не фотонов света, а ионизирующего ядерного излучения.

Амплитуда импульса на выходе ППД пропорциональна числу носителей зарядов, образованных ионизирующей частицей, а следовательно, ее энергии, что дает возможность изучать энергетический спектр излучения.

Для создания *i*-слоя в ППД используют литий, обладающий высоким коэффициентом диффузии, который добавляют в торец полупроводника с *p*-проводимостью.

Преимущества полупроводниковых детекторов: экономичность питания, весьма малые размеры и хорошее амплитудное разрешение (в 20-30 раз лучше, чем у сцинтилляционных преобразователей).

Однако их распространение ограничено. Это связано, во-первых, со сравнительно небольшими размерами чувствительной части детектора, и во-вторых, с необходимостью охлаждения детектора до низких температур (от -100 до -196^0), которое повышает их эффективность.

Контрольные вопросы

1. Какие существуют преобразователи ядерных излучений в электрический сигнал?

2. Объясните устройство газоразрядного преобразователя.

3. Объясните вольт-амперную характеристику (рис. 4.1, б) газоразрядного детектора.

4. Чем отличаются счетчики Гейгера-Мюллера от пропорциональных счетчиков?

5. Объясните устройство и работу сцинтилляционного детектора.

6. Назовите преимущества сцинтилляционных детекторов перед газоразрядными.

7. Объясните устройство и работу полупроводникового детектора, укажите его достоинства и недостатки.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Алиев Т. М., Тер-Хачатуров А. А*. Измерительная техника: Учебн. пособие для техн. вузов. – М.: Высшая школа, 1991. – 384 с.

2. *Аппаратура и оборудование для геофизических исследований нефтяных и газовых скважин:* Справочник /А. А.Молчанов, В. В. Лаптев, В. М. Моисеев, Р. С.Челокьян. – М.: Недра, 1987. – 263 с.

3. *Бондаренко В. М., Демура Г. В., Ларионов А. М.* Общий курс геофизических методов разведки: Учебн. пособие для техникумов. – П.*:* Недра, 1986. – 453 с.

4. *Бриндли К*. Измерительные преобразователи: Справочное пособие / Пер.с англ. – М.:Энергоатомиздат, 1991. – 144 с.

5. *Бухгольц В. П*. Датчики и реле автоматического контроля в горной промышленности. – М.: Недра, 1971. – 224 с.

6. *Виглеб Г*. Датчики / Пер. с нем. – М.: Мир, 1989. – 196 с.

7. *Енохович А. С*. Краткий справочник по физике. – М.: Высшая школа, 1976. – 288 с.

8. *Зачиевский Т., Мальзахер С., Квецинский А*. Промышленная электроника / Пер.с польского. – М.; Энергия, 1976. – 640 с.

9. *Зельцман П. А*. Конструирование аппаратуры для геофизических исследований скважин. – М.: Недра, 1968. – 180 с.

10. *Зимодро А. Ф., Скибинский Г. Л.* Основы автоматики. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 160 с.

11. *Квартин М. И.* Электромеханические и магнитные устройства автоматики и их расчет. – М.: Высшая школа, 1973. – 344 с.

12. *Кривко Н. Н., Шароварин В. Д., Широков В. Н.* Промыслово-геофизическая аппаратура и оборудование: Учебн. пособие для вузов. – М.: Недра, 1981. – 280 с.

13. *Ларионов В. В*. Радиометрия скважин. – М.: Недра, 1969. – 327 с.

14. *Левшина Е. С., Новицкий П. В*. Электрические измерения физических величин. Измерительные преобразователи. – Л.: Энергоатомиздат, 1983.

15. *Литвак В. И.* Тензореле. Расчет, конструирование, применение. – М.: Машиностроение, 1989. – 160 с.

16. *Логинов В. И.* Электрические измерения механических величин / Изд. 2-е, доп. – М.: Энергия, 1976. – 104 с.

17. *Померанц Л. И., Белоконь Д. В., Козяр В. Ф.* Аппаратура и оборудование геофизических методов исследования скважин: Учебн. пособие для техникумов. – М.: Недра, 1985. – 271 с.

18. *Сковородников И. Г., Калашников В. Н.* Дистанционный уровнемер для испытательных скважин // Геофизическая аппаратура. Вып.89. – Недра, 1988. – С. 98-103.

19. *Сковородников И. Г., Макаров Л. В., Калашников В. Н.* Газожидкостный расходомер РГЖ-Г: Техническое описание. – Свердловск: СГИ, 1988. – 15 с.

20. *Сковородников И. Г., Макаров Л. В., Калашников В. Н.* Изучение скорости и направления движения подземых вод // Гидрогеология и инж. геология: Обзор / ВНИИ экон. минер. сырья и геологоразв. работ. – М.,1987. – 33 с.

21. *Сковородников И. Г., Макаров Л. В., Калашников В. Н.* Скважинные тахометрические расходомеры / СГИ. – Свердловск, 1989. – 65 с. – Деп. в ВИНИТИ, №7609-В89, 1989.

22. *Справочник по средствам автоматики* / Под ред. В. Э. Низэ, И.В.Антика. – М.: Энергоиздат, 1983. – 504 с.

23. *Электрические измерения неэлектрических величин* / А. М. Туричин, П. В. Новицкий, Е. С. Левшина и др.; Изд. 5-е, перераб. и доп. – Л.: Энергия, 1975. – 676 с.

24. А. с. 491895. Зонд для измерения направления и скорости движения грунтовых вод /Б. Н. Халтурин, В. С. Лившиц // Бюл. изобр. – 1975, №42.

25. А. с. 1063990. Емкостной датчик зенитного угла / О. В.Фомин // Бюл. изобр. – 1983, № 48.

26. А. с. 1158750. Скважинный уровнемер (его варианты) / В. Н. Калашников, И. Г.Сковородников // Бюл. изобр. – 1985, № .20.

27. А. с. 1509518. Датчик угла наклона буровой скважины / А. В. Давыдов, И. Г. Сковородников // Бюл. изобр. – 1989, № 35.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебно-методическому комплексу
_____ С.А. Упоров

МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

МЕТРОЛОГИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ (КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ)

ЧАСТЬ 1

«МЕТРОЛОГИЯ»

Специальность
21.05.03 Технология геологической разведки

Автор: Глушкова Т.А., к.т.н.

Одобрен на заседании кафедры
Геофизики
(название кафедры)
Зав.кафедрой _____
(подпись)
Талалай А. Г.
(Фамилия И.О.)
Протокол № 1 от 05.10. 2020
(Дата)

Рассмотрен методической комиссией факультета
_____
(название факультета)
Председатель _____
(подпись)
Бондарев В. И.
(Фамилия И.О.)
Протокол № 2 от 13.10. 2020
(Дата)

Екатеринбург
2020

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ…….3
1 Основные понятия……...4
2 Нормативно-правовые основы метрологи……5
3 Свойства, физические величины. Измерение ФВ……7
4 Системы единиц физических величин. Система SI..……..…9
5 Виды и методы измерений ……...13
6 Средства измерений. Метрологические характеристики СИ…….....14
7 Нормирование и классы точности средств измерений……...….17
8 Погрешности измерений …….…….25
9 Правила округления и записи результата измерений……....27
10 Метрологическое обеспечение, службы и организации…….....28
11 Формы государственного регулирования в области обеспечения единства измерений…….30
12 Государственный метрологический надзор…….....31
13 Утверждение типа стандартных образцов или типа средств измерений…33
14 Поверка средств измерений…….34
15 Калибровка средств измерений……..36
16 Метрологическая экспертиза……..…37
17 Анализ и оценка состояния измерений……..38
ЗАКЛЮЧЕНИЕ…...…….…….35
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ……...36
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК…...……...37
ПРИЛОЖЕНИЕ А Сферы государственного регулирования обеспечения единства измерений…...…….43
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Значения коэффициентов Стьюдента $t(P_Д, n)$……...…..44

ВВЕДЕНИЕ

Метрология – наука об измерениях. Измерения составляют основу познания человеком окружающего мира во всех исторических периодах. Важность измерений возрастает с развитием производительных сил. Огромную роль играют измерения в современном обществе. Наука, промышленность, экономика, образование, информатика, торговля, банковская система, таможенные операции, медицина, спорт и другие сферы деятельности человека немыслимы без измерений.

Стандартизация, оценка соответствия и метрология как важнейшие составляющие технического регулирования неразрывно связаны между собой. Активная деятельность общества, органов законодательной и исполнительной властей в этих направлениях является важнейшим условием становления рыночной экономики в Российской Федерации, увеличения Внутреннего Валового Продукта, расширения международных научных, технических и торговых связей, интеграции страны в мировую экономическую систему.

Важность метрологической деятельности, обеспечения единства измерений поддержана вниманием со стороны государства.

Правовую основу метрологии составляют:

- основной закон государства - Конституция Российской Федерации;

- Федеральный закон Российской Федерации «Об обеспечении единства измерений» № 102-ФЗ от 26.06.2008;

- федеральные законы отраслевого характера в части, касающейся единства измерений.

- Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ), представляющая собой комплекс нормативно-технических документов (ГОСТов, методических указаний и т.п.), устанавливающих единую номенклатуру стандартных взаимоувязанных правил и положений, требований и норм, относящихся к организации и методике оценивания и обеспечения точности измерений.

Дальнейшее развитие экономики России, расширение международной торговли и экономического сотрудничества, выражающиеся в увеличении количества и технического совершенства товаров, расширении спектра и повышении качества услуг, потребовали совершенствования правовой базы метрологии и приведения в соответствие метрологической деятельности с уровнем развития экономики страны.

Метрология (греч.) – наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.

Различают три раздела метрологии:

- теоретическая (фундаментальная);
- законодательная;
- практическая (прикладная).

Теоретическая метрология – раздел метрологии, предметом которого является разработка фундаментальных основ метрологии.

Законодательная метрология – раздел метрологии, предметом которого является установление обязательных технических и юридических требований по применению единиц физических величин, эталонов, методов и средств измерений, направленных на обеспечение единства и необходимости точности измерений в интересах общества.

Практическая метрология – раздел метрологии, предметом которого являются вопросы практического применения разработок теоретической метрологии и положений законодательной метрологи.

Измерения играют огромную роль в науке, промышленности, экономике и коммуникациях. Практически отсутствуют сферы деятельности, где не применяют результаты измерений, испытаний, контроля.

1 Основные понятия

Аттестация методик (методов) измерений - исследование и подтверждение соответствия методик (методов) измерений установленным метрологическим требованиям к измерениям;

Ввод в эксплуатацию средства измерений - документально оформленная в установленном порядке готовность средства измерений к использованию по назначению;

Государственный метрологический надзор - контрольная деятельность в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, осуществляемая уполномоченными федеральными органами исполнительной власти и заключающаяся в систематической проверке соблюдения установленных законодательством Российской Федерации обязательных требований, а также в применении установленных законодательством Российской Федерации мер за нарушения, выявленные во время надзорных действий;

Государственный первичный эталон единицы величины - государственный эталон единицы величины, обеспечивающий воспроизведение, хранение и передачу единицы величины с наивысшей в Российской Федерации точностью, утверждаемый в этом качестве в установленном порядке и применяемый в качестве исходного на территории Российской Федерации;

Государственный эталон единицы величины - эталон единицы величины, находящийся в федеральной собственности;

Единица величины - фиксированное значение величины, которое принято за единицу данной величины и применяется для количественного выражения однородных с ней величин;

Единство измерений - состояние измерений, при котором их результаты выражены в допущенных к применению в Российской Федерации единицах величин, а показатели точности измерений не выходят за установленные границы;

Измерение - совокупность операций, выполняемых для определения количественного значения величины;

Испытания стандартных образцов или средств измерений в целях утверждения типа - работы по определению метрологических и технических характеристик однотипных стандартных образцов или средств измерений.

Калибровка средств измерений - совокупность операций, выполняемых в целях определения действительных значений метрологических характеристик средств измерений.

Методика (метод) измерений - совокупность конкретно описанных операций, выполнение которых обеспечивает получение результатов измерений с установленными показателями точности.

Метрологическая служба - организующие и (или) выполняющие работы по обеспечению единства измерений и (или) оказывающие услуги по обеспечению единства измерений структурное подразделение центрального аппарата федерального органа исполнительной власти и (или) его территориального органа, юридическое лицо или структурное подразделение юридического лица либо объединения юридических лиц, работники юридического лица, индивидуальный предприниматель.

Метрологическая экспертиза - анализ и оценка правильности установления и соблюдения метрологических требований применительно к объекту, подвергаемому экспертизе. Метрологическая экспертиза проводится в обязательном (обязательная метрологическая экспертиза) или добровольном порядке.

Обязательные метрологические требования - метрологические требования, установленные нормативными правовыми актами Российской Федерации и обязательные для соблюдения на территории Российской Федерации.

Передача единицы величины - приведение единицы величины, хранимой средством измерений, к единице величины, воспроизводимой эталоном данной единицы величины или стандартным образцом.

Поверка средств измерений - совокупность операций, выполняемых в целях подтверждения соответствия средств измерений метрологическим требованиям.

Прослеживаемость - свойство эталона единицы величины или средства измерений, заключающееся в документально подтвержденном установлении их связи с государственным первичным эталоном соответствующей единицы величины посредством сличения эталонов единиц величин, поверки, калибровки средств измерений.

Прямое измерение - измерение, при котором искомое значение величины получают непосредственно от средства измерений.

Сличение эталонов единиц величин - совокупность операций, устанавливающих соотношение между единицами величин, воспроизводимых эталонами единиц величин одного уровня точности и в одинаковых условиях.

Средство измерений - техническое средство, предназначенное для измерений.

Стандартный образец - образец вещества (материала) с установленными по результатам испытаний значениями одной и более величин, характеризующих состав или свойство этого вещества (материала).

Тип средств измерений - совокупность средств измерений, предназначенных для измерений одних и тех же величин, выраженных в одних и тех же единицах величин, основанных на одном и том же принципе действия, имеющих одинаковую конструкцию и изготовленных по одной и той же технической документации.

Тип стандартных образцов - совокупность стандартных образцов одного и того же назначения, изготавливаемых из одного и того же вещества (материала) по одной и той же технической документации

Утверждение типа стандартных образцов или типа средств измерений - документально оформленное в установленном порядке решение о признании соответствия типа стандартных образцов или типа средств измерений метрологическим и техническим требованиям (характеристикам) на основании результатов испытаний стандартных образцов или средств измерений в целях утверждения типа;

Фасованные товары в упаковках - товары, которые упаковываются в отсутствие покупателя, при этом содержимое упаковки не может быть изменено без ее вскрытия или деформирования, а масса, объем, длина, площадь или иные величины, определяющие количество содержащегося в упаковке товара, должны быть обозначены на упаковке;

Эталон единицы величины - техническое средство, предназначенное для воспроизведения, хранения и передачи единицы величины.

2 Нормативно-правовые основы метрологии

Значимость и высокая ответственность измерений в экономике государства обуславливают необходимость установления в законодательном порядке комплекса правовых актов и положений по метрологии. Россия в числе семнадцати государств подписала Метрическую конвенцию в 1875 г.

Вся метрологическая деятельность в РФ основана на конституционной норме (Конституция РФ, статья 71, пункт «Р»), которая закрепляет централизованное государственное руководство основными вопросами законодательной метрологии. В федеральном ведении находятся стандарты, эталоны, метрическая система и исчисление времени.

В целях реализации конституционной нормы приняты Федеральные законы «Об обеспечении единства измерений», «О техническом регулировании», составляющие правовые основы метрологической деятельности.

Нормативные документы по обеспечению единства измерений:

- постановления Правительства РФ по отдельным вопросам и направлениям метрологической деятельности;

- комплекс нормативно-технических документов (ГОСТов, методических указаний и т.п.) государственной системы обеспечения единства измерений (ГСИ), устанавливающих единую номенклатуру стандартных взаимоувязанных

правил и положений, требований и норм, относящихся к организации и методике оценивания и обеспечения точности измерений;

- рекомендации государственных научных метрологических центров Ростстандарта.

Основные *цели* ФЗ «Об обеспечении единства измерений»:

- установление правовых основ обеспечения единства измерений в Российской Федерации;

- защита прав и законных интересов граждан, общества и государства от отрицательных последствий недостоверных результатов измерений;

- обеспечение потребности граждан, общества и государства в получении объективных, достоверных и сопоставимых результатов измерений, используемых в целях защиты жизни и здоровья граждан, охраны окружающей среды, животного и растительного мира, обеспечения обороны и безопасности государства, в том числе экономической безопасности;

- содействие развитию экономики Российской Федерации и научно-техническому прогрессу.

Закон закрепляет одно из основных понятий метрологии – единство измерений и другие понятия.

Закон устанавливает, что государственное управление деятельностью по обеспечению единства измерений осуществляет Национальный орган РФ по метрологии – *Росстандарт (*ранее назывался *Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии),* определяет его цели, задачи, компетенцию, ответственность и полномочия.

Положения Закона расширены *Государственной системой обеспечения единства измерений* (ГСИ) - комплексом нормативных документов межрегионального и межотраслевого уровней, устанавливающих правила, нормы, требования, направленные на достижение и поддержание единства измерений в РФ.

Основные *объекты* ГСИ:

- единицы физических величин;

- государственные эталоны, поверочные схемы;

- методы и средства поверки СИ;

- номенклатура и способы нормирования МХ СИ;

- нормы точности измерений;

- способы выражения и формы представления результатов и показателей точности измерений;

- методики выполнения измерений;

- методики оценки достоверности и формы представления данных о свойствах веществ и материалов;

- требования к стандартным образцам свойств веществ и материалов;

- термины и определения в области метрологии;

- организация и порядок проведения государственных испытаний СИ, поверки и метрологической аттестации СИ и испытательного оборудования;

- организация и порядок проведения калибровки СИ, метрологической экспертизы нормативно-технической, проектной, конструкторской и технологической документации, а также экспертизы свойств материалов и веществ.

В дополнение и для реализации положений ФЗ «Об обеспечении единства измерений» Правительство РФ разрабатывает и принимает подзаконные акты – нормативные документы в области метрологии.

3 Свойства, физические величины. Измерение ФВ

Свойство – философская категория, выражающая такую сторону объекта (явления, процесса), которая обуславливает его различие или общность с другими объектами (явлениями, процессами) и обнаруживается в его отношении к ним. Свойство – категория качественная.

Величина – свойство чего-либо, что может быть выделено среди других свойств и оценено тем или иным способом, в том числе и количественно.

Величины подразделяют на два вида:

- идеальные;
- реальные.

Идеальные величины – являются обобщением (моделью) конкретных реальных понятий и относятся главным образом к математике.

Реальные величины подразделяют на две группы:

- нефизические;
- физические.

Нефизические величины свойственны общественным наукам (философия, психология, социология, экономика). Нефизические величины не могут быть измерены, а только оценены.

Физические величины свойственны материальным объектам (процессам, явлениям), изучаемым в естественных (физика, химия) и технических (машиноведение, электротехника) науках.

Физическая величина (ФВ) – одно из свойств физического объекта, в качественном отношении общее для многих физических объектов, а в количественном - индивидуальное, для каждого из них (твёрдость, плотность, теплопроводность, электропроводность).

По возможности измерения ФВ подразделяют на:

- измеряемые;
- оцениваемые.

Измеряемые – величины, которые могут быть выражены количественно в виде определённого числа установленных единиц измерения.

Оцениваемые – величины, для которых не может быть введена единица измерения.

По видам явлений ФВ подразделяют на группы:

- *вещественные*;
- *энергетические*;
- *характеризующие протекание процессов во времени*.

Вещественные – описывают физические и физико-химические свойства веществ, материалов (масса, плотность, электрическое сопротивление).

Энергетические – описывают энергетические характеристики процессов преобразования, передачи, использования энергии (энергия, мощность, сила и напряжение электрического тока).

Характеризующие протекание процессов во времени – различного рода спектральные характеристики, корреляционные функции.

По принадлежности к различным физическим процессам ФВ классифицируют на:

- пространственно-временные;
- механические, тепловые, электрические, магнитные;
- акустические, световые;
- физико-химические;
- ионизирующих излучений, атомной и ядерной физики.

По степени зависимости от других величин ФВ подразделяют на:

- основные (условно независимые);
- производные (условно зависимые);
- дополнительные.

Измерение ФВ – познавательный процесс, заключающийся в сравнении путём физического эксперимента данной ФВ с её известной величиной, принятой за единицу измерения.

Основное уравнение измерения – уравнение вида:

$$Q = q \cdot /Q/. \qquad (1)$$

Значение ФВ - Q – оценка её размера в виде некоторого числа принятых для неё единиц.

Числовое значение ФВ - q – отвлечённое число, показывающее отношение значения величины к единице измерения данной величины.

Единица ФВ - /Q/ – величина фиксированного размера, которой условно присвоено числовое значение равное единице измеряемой величины. Единицу ФВ применяют для количественного выражения однородных величин.

В практической деятельности производят измерения различных величин, характеризующих свойства тел, веществ, явлений и процессов. Разнообразные количественные или качественные проявления любого свойства образуют множества, отображения которых образуют шкалы.

Шкала ФВ – упорядоченная последовательность значений, принятая по соглашению на основании результатов точных измерений. В соответствии с логической структурой проявления свойств различают шкалы измерений:

- шкала наименований (шкала цветов);
- шкала порядка (шкалы вязкости вещества, силы ветра);
- шкала интервалов (шкалы летоисчисления, температур);
- шкала отношений, (шкалы массы, термодинамической температуры);
- абсолютная шкала (шкалы относительных величин - усиления, ослабления).

Шкалы наименований и порядка называют неметрическими (концептуальными), шкалы интервалов и соотношений - метрическими. Метрические и абсолютные шкалы относят к разряду линейных. Практическая реализация шкал из-

мерений осуществляют стандартизацией шкал, единиц измерений, способов и условий их однозначного воспроизведения.

4 Системы единиц физических величин. Система SI

Система ФВ – совокупность ФВ, в которой одни величины принимают независимыми, а другие являются их функциями.

Обосновано, но произвольным образом выбирают несколько ФВ и называют *основными*. Остальные выражают через основные на основе известных уравнений связи между ними и называют *производными*.

Система единиц ФВ - совокупность основных, производных и дополнительных единиц ФВ, образованная в соответствии с принятыми принципами.

В науке и технике в разное время применяли системы единиц:

- СГС (сантиметр, грамм, секунда);
- МКС (метр, килограмм, секунда);
- МКСГ (метр, килограмм, секунда, градус);
- МКСА (метр, килограмм, секунда, ампер);
- МСС (метр, секунда, свеча) и ряд других.

Единая международная система единиц (SI) принята Генеральной конференцией по мерам и весам в 1960 г. На территории РФ действует в соответствии с ГОСТ 8.417-2002 система единиц SI. Международная система (SI , фр. Le Système International d'Unités) для механических единиц совпадает с системой МКС, а для электромагнитных - с системой МКСА.

Система SI принята для применения в большинстве стран мира, что обусловлено её достоинствами:

- универсальность, применение во всех областях науки и техники;
- унификация всех областей и видов измерений;
- когерентность величин;
- возможность воспроизведения единиц с высокой точностью;
- упрощение записи формул в физике, химии, технических науках;
- уменьшение числа допускаемых единиц измерения;
- единая система образования десятичных кратных и дольных единиц, имеющих собственные наименования;
- облегчение педагогического процесса в средней и высшей школах;
- лучшее взаимопонимание при развитии научно-технических и экономических связей между различными странами.

Международная система физических единиц СИ включает семь основных и две дополнительные единицы.

Основные единицы системы SI:

-*метр* – единица длины – длина пути, которую проходит свет в вакууме за 1/299 792 458 долю секунды;

-*килограмм* – единица массы - масса международного прототипа – цилиндра, изготовленного из сплава платины и иридия;

-*секунда* – единица времени - продолжительность 9 192 631 770 периодов излучения, соответствующих переходу между двумя уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома цезия Cs^{133};

-*ампер* – единица силы тока - сила тока, которая при прохождении по двум параллельным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенным на расстоянии 1 метр один от другого, в вакууме создала бы между этими проводниками силу, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Ньютонов на каждый метр длины;

-*кельвин* – единица температуры - температура, составляющая 1/273,16 часть термодинамической температуры тройной точки воды;

-*моль* – единица количества вещества - количество вещества, содержащее столько же структурных элементов, сколько атомов содержится в нуклиде углерода C^{12} – массой 0,012 кг;

-*кандела* – единица силы света - сила света в заданном направлении от источника, испускающего монохроматическое излучение частотой 540 10^{12} Гц, энергетическая сила которого составляет 1/683 Вт/$ср^2$.

Дополнительные единицы системы СИ:

радиан – единица плоского угла - плоский угол между двумя радиусами окружности, длина дуги которой равна радиусу;

стерадиан – единица телесного угла - телесный угол с вершиной в центре сферы, вырезающий на поверхности площадь, равную площади квадрата со стороной, равной радиусу сферы.

Производные единицы могут быть когерентными и некогерентными.

Когерентная единица – производная единица ФВ, связанная с другими единицами системы уравнением, в котором числовой множитель равен единице.

Единицы ФВ подразделяются на системные и внесистемные.

Системная – единица ФВ, входящая в одну из принятых систем.

Внесистемная – единица ФВ, не входящая ни в одну из принятых систем единиц.

По отношению к единицам системы SI внесистемные единицы подразделяют на:

- допускаемые к применению наравне с единицами системы SI (единица массы – тонна, плоского угла – градус, минута, секунда);

- допускаемые к применению в специальных областях науки (единицы длины в астрономии – астрономическая единица, парсек, световой год);

- временно допускаемые к применению наравне с единицами SI (единица длины в морском деле – миля, массы в ювелирном деле – карат);

- изъятые из употребления (единица давления – миллиметр ртутного столба, мощности – лошадиная сила).

Производные единицы системы SI, имеющие специальные названия, приведены в таблице 1. Внесистемные единицы, допускаемые к применению наравне с единицами системы SI, приведены в таблице 2. Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименования приведены в таблице 3.

Таблица 1 Производные единицы системы СИ, имеющие специальные названия

Величина	Единица	
Наименование	Наименование	Обозначение
Частота	герц	Гц
Сила, вес	ньютон	Н
Давление, механическое напряжение	паскаль	Па
Энергия, работа, количество теплоты	джоуль	Дж
Мощность	ватт	Вт
Количество электричества	кулон	Кл
Электрическое напряжение	вольт	В
Электрическая ёмкость	фарад	Ф
Электрическое сопротивление	Ом	Ом
Электрическая проводимость	сименс	См
Поток магнитной индукции	вебер	Вб
Магнитная индукция	тесла	Тл
Индуктивность	генри	Гн
Световой поток	люмен	лм
Освещённость	люкс	лк
Активность радионуклида	беккерель	Бк
Поглощённая доза ионизирующего излучения	грей	Гр
Эквивалентная доза излучения	зиверт	Зв

Таблица 2 Внесистемные единицы, допускаемые к применению наравне с единицами СИ

Наименование величины	Единица		
	Наименование	Обозначение	Соотношение с единицей СИ
Масса	тонна	т	10^3 кг
	атомная единица массы	а. е. м.	$1{,}66 \cdot 10^{-27}$ кг
Время	минута	мин	60 с
	час	ч	3 600 с
	сутки	сут	86 400 с
Плоский угол	градус	^{0}	$1{,}745 \cdot 10^{-2}$ рад
	минута	... $^/$	$2{,}909 \cdot 10^{-4}$ рад
	секунда	... $^{//}$	$4{,}848 \cdot 10^{-6}$ рад
Длина	астрономическая единица	а. е.	$1{,}456 \cdot 10^{11}$ м
	световой год	св. год	$9{,}461 \cdot 10^{15}$ м
	парсек	ПК	$3{,}086 \cdot 10^{16}$ м
Оптическая сила	диоптрия	дптр	1 $м^{-1}$
Площадь	гектар	га	$1 \cdot 10^4$ $м^2$
Энергия	электрон-вольт	эВ	$1{,}602 \cdot 10^{-19}$ Дж
Полная мощность	вольт-ампер	ВА	-
Реактивная мощность	вар	вар	-

Таблица 3 Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименования

Множитель	Приставка	Обозначение		Множитель	Приставка	Обозначение	
		международное	русское			международное	русское
10^{18}	экса	E	Э	10^{-1}	деци	d	д
10^{15}	пета	P	П	10^{-2}	санти	c	с
10^{12}	тера	T	Т	10^{-3}	милли	m	м
10^{9}	гига	G	Г	10^{-6}	микро	μ	мк
10^{6}	мега	M	М	10^{-9}	нано	n	н
10^{3}	кило	k	к	10^{-12}	пико	p	п
10^{2}	гекто	h	г	10^{-15}	фемто	f	ф
10^{1}	дека	da	да	10^{-18}	атто	a	а

5 Виды, методы измерений

Виды измерений определяются физическим характером измеряемой величины, требуемой точностью измерения, скоростью изменения измеряемой величины, условиями измерений. С развитием науки и техники увеличивается количество видов и совершенствуются методы измерений.

В зависимости от цели различают измерения: контрольные, диагностические и прогностические, лабораторные и технические, эталонные и поверочные, абсолютные и относительные.

Измерения могут быть: контактные и бесконтактные, одно- и многократные, необходимые и избыточные, статические и динамические, с точным и приблизительным оцениванием погрешности.

По способу получения результата различают ***виды*** измерений:

- *прямые* – искомое значение величины находят экспериментальным сравнением её с единицей измерения (мерой) или отсчётом показаний прибора, отградуированного в установленных единицах (измерение длины линейкой, измерение температуры термометром). Прямые измерения – основа более сложных;

- *косвенные* – искомое значение величины находят по результатам прямых измерений нескольких величин, связанных с искомой известной зависимостью (измерение плотности тела по измеренным массе и линейным размерам, измерение мощности электрической цепи по измеренным значениям силы тока и напряжения);

- *совокупные* – искомое значение величины находят решением системы уравнений, составленных по результатам производимых одновременно прямых измерений нескольких *одноимённых* величин (измерение температурного коэффициента линейного расширения);

- *совместные* – искомое значение величины находят решением системы уравнений, составленных по результатам производимых одновременно прямых и косвенных измерений нескольких *неодноимённых* величин (измерение электрического сопротивления проводника при различных фиксированных значениях температуры).

Метод измерения – прием или совокупность приемов сравнения измеряемой физической величины с ее единицей в соответствии с реализованным принципом измерений.

Принцип измерения – физическое явление или эффект, положенное в основу измерений (измерение температуры по расширению тела).

Стандартные методы прямых измерений:

- *непосредственной оценки* – метод измерений, при котором значение величины определяют непосредственно по показывающему средству измерений (измерение давления пружинным манометром, силы электрического тока - амперметром);

- *сравнения с мерой* – метод измерений, в котором измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой (измерение массы на рычажных весах с помощью гирь);

- *дополнения* – метод сравнения с мерой, в котором значение измеряемой величины дополняется мерой этой же величины с таким расчетом, чтобы на прибор сравнения воздействовала их сумма, равная заранее заданному значению;

- *дифференциальный* – метод измерений, при котором измеряемая величина сравнивается с однородной величиной, имеющей известное значение, незначительно отличающееся от значения измеряемой величины, и при котором измеряется разность между этими двумя величинами;

- *нулевой* – метод сравнения с мерой, в котором результирующий эффект воздействия измеряемой величины и меры на прибор сравнения доводят до нуля;

- *замещения* – метод сравнения с мерой, в котором измеряемую величину замещают мерой с известным значением величины (поочередное помещение измеряемой массы и гирь на одну и ту же чашу весов).

Нестандартные методы измерений:

- *противопоставления* – метод, при котором измеряемая величина и величина, воспроизводимая мерой, одновременно действуют на прибор сравнения (измерение массы на равноплечих весах с помещением измеряемой массы и уравновешивающих её гирь на двух чашах);

- *совпадения* – метод, при котором разность между сравниваемыми величинами измеряют по совпадению отметок шкал или периодических сигналов (штангенциркуль, стробоскоп).

6 Средства измерений. Метрологические характеристики СИ

Средство измерения (СИ) – техническое средство, предназначенное для измерений, имеющее нормированные метрологические характеристики, воспроизводящее и (или) хранящее единицу ФВ, размер которой принимается неизменным в пределах установленной погрешности в течение известного интервала времени.

СИ сгруппированы по отдельным классификационным признакам:

- *по способу регистрации сигнала* - показывающие, регистрирующие (печатающие, пишущие), комбинированные (одновременно показывающие и регистрирующие), интегрирующие (суммирующие);

- *по роду выходного сигнала* - аналоговые, цифровые, аналого-цифровые;

- *по физической природе* измеряемой величины - механические, гидравлические, пневматические, тепловые, акустические, электрические, электронные, комбинированные и прочие;

- *по виду шкалы* - с равномерной и неравномерной шкалой, с нулевой отметкой внутри, на краю или вне шкалы;

- *по степени автоматизации* - неавтоматические (с ручной наводкой), автоматизированные, автоматические;

- *по характеру использования* - образцовые, лабораторные, технические (промышленные), полевые.

Основные *виды* СИ:

- *мера* – средство, хранящее или воспроизводящее ФВ заданного размера. Мера может быть однозначной (гиря, калибр) и многозначной (измерительная линейка, магазин электрических сопротивлений). Измерение методом сравнения с мерой выполняют с помощью специальных средств - компараторов (равноплечие весы, электрический измерительный мост). В ряде случаев в качестве компаратора выступает человек - оператор;

- *измерительный преобразователь* – средство, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, обработки, хранения, но не доступной для непосредственного восприятия оператором (термопара, термометр сопротивления, усилитель);

- *измерительный прибор* – средство, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для непосредственного восприятия оператором (амперметр, вольтметр, манометр);

- *измерительная установка* – совокупность функционально объединённых СИ и вспомогательных устройств, расположенных в одном месте (установки для поверки измерительных приборов, испытаний электротехнических материалов);

- *измерительная система* – комплекс СИ и устройств связи (проводная, инфракрасная, радио, телевизионная, оптоволоконная), предназначенный для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для использования в системах автоматического контроля и управления;

- *информационно-вычислительный комплекс* (ИВК) – системы автоматического контроля и управления, технического диагностирования, распознавания образов на базе микропроцессорной и вычислительной техники;

- *измерительные принадлежности* – вспомогательные средства измерений величин (термометр, психрометр для измерения параметров воздуха).

По метрологическому назначению СИ подразделяют на два вида:

- метрологические (эталоны);

- рабочие (лабораторные, производственные, полевые).

Эталон – высокоточная мера, предназначенная для воспроизведения, хранения единицы величины с целью передачи её значения другим менее точным СИ. Эталоны классифицируют на первичные (составляют основу государственной системы измерений), вторичные, рабочие (разрядные). Рабочие эталоны воспринимают размер единицы от вторичных эталонов и передают его рабочим СИ.

Эталонная база РФ имеет в своём составе 128 государственных и более 250 вторичных эталонов ФВ.

Перспективное направление развития эталонов – переход на эталоны, основанные на квантовых эффектах. Способность таких эталонов воспроизводить единицы величин не зависит от внешних условий, географического местонахождения, времени.

Рабочие СИ – средства измерений, предназначенные для выполнения измерений в лабораторных и производственных условиях.

Метрологические характеристики (МХ) – характеристики, которые позволяют судить о пригодности СИ для измерений в известном диапазоне с известной точностью.

Индикаторы – приборы и вещества, не имеющие нормированных МХ.

МХ вводят для СИ с целями:

- обеспечения возможности установления точности измерений;
- достижения взаимозаменяемости СИ;
- сравнения и выбора нужных СИ по точности измерений;
- определения погрешности измерительных систем и установок на основе МХ входящих в них СИ;
- оценки технического состояния СИ при поверке.

Нормальные МХ устанавливают нормативными документами. Наибольшее распространение на практике получили МХ:

- *диапазон показаний* – область значений шкалы, ограниченная начальным и конечным значениями;
- *диапазон измерений* – область значений измеряемой величины, для которой нормированы допускаемые пределы погрешности;
- *цена деления шкалы* – разность значений величин, соответствующих двум соседним отметкам шкалы. СИ с равномерной шкалой имеют постоянную цену деления, а с неравномерной - переменную;
- *чувствительность S* – отношение изменения сигнала на выходе Δy к вызвавшему это изменение изменению Δx сигнала на входе:

$$S = \Delta y / \Delta x. \qquad (2)$$

Для стрелочного прибора это отношение перемещения *dl* конца стрелки к вызвавшему его изменению *dx* измеряемой величины:

$$S = dl / dx; \qquad (3)$$

- *постоянная прибора C* – величина обратная чувствительности:

$$C = 1/S; \qquad (4)$$

- *порог чувствительности* – наименьшее значение измеряемой величины, вызывающее заметное изменение показаний прибора;
- *вариация (гистерезис) H* – разность между показаниями в данной точке диапазона измерения при возрастании и убывании измеряемой величины и неизменных внешних условий. Вариация обусловлена наличием зазоров, тепловым или упругим последействием элементов конструкции:

$$H = / x_в – x_у /, \qquad (5)$$

где $x_в$, x_y – соответственно значения измерений образцовым прибором при возрастании и убывании величины x;

- *градуировочная характеристика* – зависимость между выходным и входным сигналами СИ, полученная расчётом или экспериментально, представленная аналитически, графически или в виде таблицы. Градуировочная характеристика может изменяться в течение времени под воздействием внутренних и внешних причин.

Основным видом МХ является *погрешность* измерений – разность между показаниями СИ и истинными (действительными) значениями ФВ. Погрешности в зависимости от влияния внешних условий на результат измерений подразделяют на два вида:

- *основная погрешность* – погрешность СИ при нормальных условиях эксплуатации. Нормальные условия: температура 293 $\pm$ 5 К, относительная влажность воздуха 65 $\pm$ 15%, напряжение в сети электропитания 220 В $\pm$ 10% с частотой 50 Гц $\pm$ 1%, атмосферное давление от 97,4 до 104,0 кПа, отсутствие наводок электрических и электромагнитных полей;

- *дополнительная погрешность* – погрешность измерений, возникающая при отклонении влияющих величин за диапазон значений, установленных нормальными условиями.

Существует несколько способов нормирования погрешности. Наибольшее применение в практике измерений аналоговыми СИ получило нормирование *класса точности* по приведённой погрешности γ, постоянной во всём диапазоне измерений.

7 Нормирование и классы точности средств измерений

Точность средств измерений определяется предельно-допустимыми погрешностями, которые могут быть получены при его использовании.

Нормированием погрешностей средств измерений называют процедуру назначения допустимых границ основной и дополнительных погрешностей измерений, при использовании этих средств измерений, а также выбор формы указания этих границ в нормативно-технической документации.

Пределы допускаемой основной и дополнительных погрешностей определяются разработчиками для каждого типа средств измерений на стадии подготовки производства. В зависимости от назначения средства измерений и характера изменения погрешности в пределах диапазона измерений нормируется для средств измерений различного типа либо предельно-допустимое значение основной абсолютной погрешности, либо предельно-допустимое значение основной приведенной погрешности, либо предельно-допустимое значение основной относительной погрешности.

Для каждого типа средств измерений характер изменения погрешности в пределах диапазона измерений зависит от принципа действия этого средства измерений и может быть самым разнообразным. Однако, как показала практика, среди этого многообразия часто удается выделить три типовых случая, предопределяющих выбор формы представления пределов допускаемой погрешно-

сти. Типовые варианты отклонения реальных передаточных характеристик средств измерений от номинальной характеристики и соответствующие им графики изменения предельных значений абсолютной и относительной погрешностей в зависимости от измеряемой величины приведены на рисунке 1.

Если реальная передаточная характеристика средства измерений смещена по отношению к номинальной (1-й график на рисунке 1а), абсолютная погрешность, возникающая при этом, (1-й график на рисунке 1б), не зависит от измеряемой величины.

Составляющую погрешности средства измерений, не зависящую от измеряемой величины, называют **аддитивной погрешностью.**

Если угол наклона реальной передаточной характеристики средства измерений отличается от номинального (2-й график на рисунке 1а), то абсолютная погрешность будет линейно зависеть от измеряемой величины (2-й график на рисунке 1б).

Составляющую погрешности средства измерений, линейно зависящую от измеряемой величины, называют **мультипликативной погрешностью.**

Если реальная передаточная характеристика средства измерений смещена по отношению к номинальной и угол ее наклона отличается от номинального (3-й график на рисунке 1а), то в этом случае имеет место как аддитивная, так и мультипликативная погрешность.

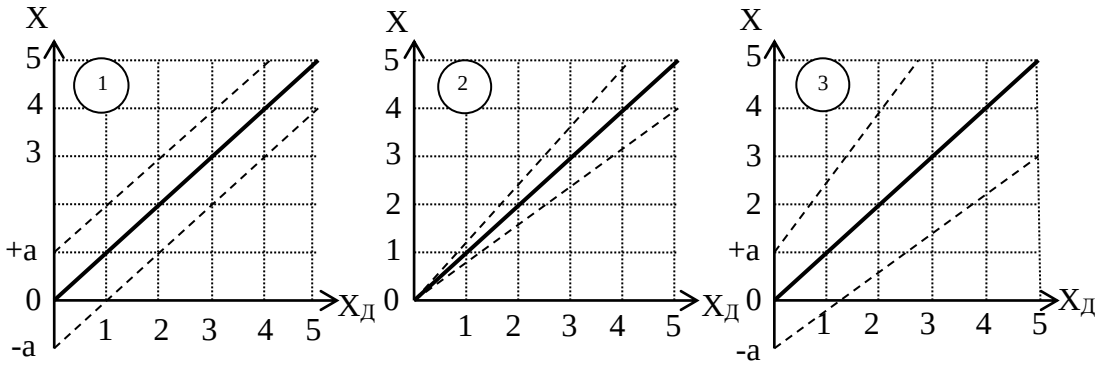
Аддитивная погрешность возникает из-за неточной установки нулевого значения перед началом измерений, ухода нуля в процессе измерений, из-за наличия трений в опорах измерительного механизма, из-за наличия термо-ЭДС в контактных соединениях и т.д.

Мультипликативная погрешность возникает при изменении коэффициентов усиления или ослабления входных сигналов (например, при изменении температуры окружающей среды, или вследствие старения элементов), из-за изменения значений, воспроизводимых мерами, встроенными в измерительные приборы, из-за изменений жесткости пружин, создающих противодействующий момент в электромеханических приборах и т.д.

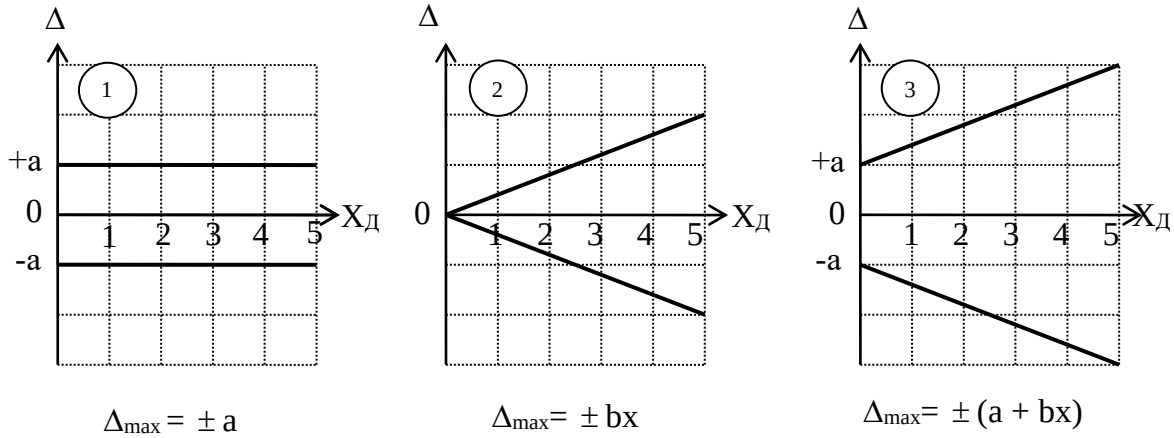
Ширина полосы неопределенности значений абсолютной (рисунке 1б) и относительной (рисунке 1в) погрешностей характеризует разброс и изменение в процессе эксплуатации индивидуальных характеристик множества находящихся в обращении средств измерений определенного типа.

А) Нормирование пределов допускаемой основной погрешности для средств измерений с преобладающей аддитивной погрешностью.

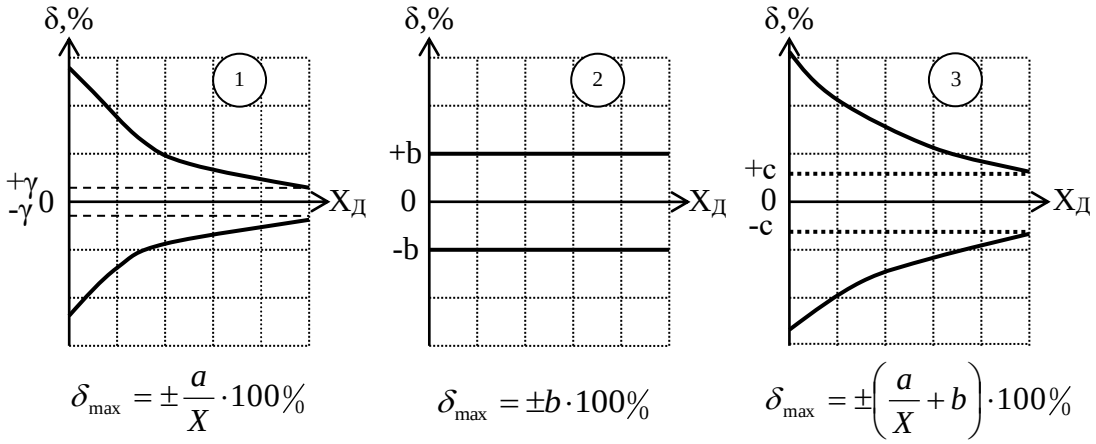
Для средств измерений с преобладающей аддитивной погрешностью (1-й график на рисунке 1) удобно нормировать одним числом предельно-допустимое значение абсолютной погрешности ($\Delta_{max}= \pm a$). В этом случае фактическая абсолютная погрешность Δ каждого экземпляра средства измерений данного типа на различных участках шкалы может иметь различные значения, но не должна превышать предельно-допустимой величины ($\Delta \leq \pm a$).



а) Типовые варианты отклонения реальных передаточных характеристик средств измерений от номинальной характеристики.



б) Пределы допускаемой абсолютной погрешности.



в) Пределы допускаемой относительной погрешности.

Рисунок 1 Иллюстрации к выбору формы представления пределов допускаемой основной погрешности

В многопредельных измерительных приборах с преобладающей аддитивной погрешностью для каждого предела измерений пришлось бы указывать свое значение предельно допустимой абсолютной погрешности. К сожалению, как видно из 1-го графика на рисунке 1в, нормировать одним числом предел допускаемой относительной погрешности в различных точках шкалы не представляется возможным. По этой причине для средств измерений с преобладающей аддитивной погрешностью часто нормируют одним числом значение так называемой основной **приведенной относительной погрешности**

Ширина полосы неопределенности значений абсолютной (рисунке 1б) и относительной (рисунке 1в) погрешностей характеризует разброс и изменение в процессе эксплуатации индивидуальных характеристик множества находящихся в обращении средств измерений определенного типа.

А) Нормирование пределов допускаемой основной погрешности для средств измерений с преобладающей аддитивной погрешностью.

Для средств измерений с преобладающей аддитивной погрешностью (1-й график на рисунке 1) удобно нормировать одним числом предельно-допустимое значение абсолютной погрешности ($\Delta_{max}= \pm a$). В этом случае фактическая абсолютная погрешность Δ каждого экземпляра средства измерений данного типа на различных участках шкалы может иметь различные значения, но не должна превышать предельно-допустимой величины ($\Delta \le \pm a$). В многопредельных измерительных приборах с преобладающей аддитивной погрешностью для каждого предела измерений пришлось бы указывать свое значение предельно допустимой абсолютной погрешности. К сожалению, как видно из 1-го графика на рисунке 1в, нормировать одним числом предел допускаемой относительной погрешности в различных точках шкалы не представляется возможным. По этой причине для средств измерений с преобладающей аддитивной погрешностью часто нормируют одним числом значение так называемой основной **приведенной относительной погрешности**

$$\gamma = \pm \frac{\Delta_{max}}{X_N} \cdot 100\% = \pm \frac{a}{X_N} \cdot 100\%,$$

где X_N – нормирующее значение.

Таким способом, например, нормируются погрешности большинства электромеханических и электронных приборов со стрелочными индикаторами. В качестве нормирующего значения X_N обычно используется предел измерений ($X_N = X_{max}$), удвоенное значение предела измерений (если нулевая отметка находится в середине шкалы), или длина шкалы (для приборов с неравномерной шкалой). Если $X_N = X_{max}$, то значение приведенной погрешности γ равно пределу допускаемой относительной погрешности средства измерений в точке, соответствующей пределу измерений. По заданному значению предела допускаемой основной приведенной погрешности легко определить предел допускаемой основной абсолютной погрешности для каждого предела измерений многопредельного прибора:

$$\Delta_{max} = \pm \frac{\gamma \cdot X_{max}}{100}.$$

После этого для любой отметки шкалы X может быть произведена оценка предельно-допустимой основной относительной погрешности:

$$\delta = \pm \frac{\Delta_{\max}}{X} \cdot 100\% = \pm\gamma \frac{X_{\max}}{X}.$$

Б) Нормирование пределов допускаемой основной погрешности для средств измерений с преобладающей мультипликативной погрешностью.

Как видно из рисунке 1 (2-й график), для средств измерений с преобладающей мультипликативной погрешностью, одним числом удобно нормировать предел допускаемой основной относительной погрешности (рисунке 1в) $\delta_{max} = \pm b \cdot 100\%$. В этом случае, фактическая относительная погрешность каждого экземпляра средства измерений данного типа на различных участках шкалы может иметь различные значения, но не должна превышать предельно допустимой величины ($\delta \leq \pm b \cdot 100\%$). По заданному значению предельно допустимой относительной погрешности δ_{max} для любой точки шкалы может быть произведена оценка предельно-допустимой абсолютной погрешности:

$$\Delta \leq \pm \frac{\delta_{\max} \cdot X}{100\%} = \pm b \cdot X.$$

К числу средств измерений с преобладающей мультипликативной погрешностью относится большинство многозначных мер, счетчики электрической энергии, счетчики воды, расходомеры и др. Следует отметить, что для реальных средств измерений с преобладающей мультипликативной погрешностью не удается полностью устранить аддитивную погрешность. По этой причине в технической документации всегда указывается наименьшее значение измеряемой величины, для которого предел допускаемой основной относительной погрешности ещё не превышает заданного значения δ_{max}. Ниже этого наименьшего значения измеряемой величины погрешность измерений не нормируется и является неопределенной.

В) Нормирование пределов допускаемой основной погрешности для средств измерений с соизмеримой аддитивной и мультипликативной погрешностью.

Если аддитивная и мультипликативная составляющая погрешности средства измерений соизмеримы (3-й график на рисунке 1), то задание предельно-допустимой погрешности одним числом не представляется возможным. В этом случае либо нормируется предел допускаемой абсолютной основной погрешности (указываются предельно-допустимые значения a и b), либо (чаще всего) нормируется предел допускаемой относительной основной погрешности. В последнем случае численные значения предельно-допустимых относительных погрешностей в различных точках шкалы оцениваются по формуле:

$$\delta_{\max} = \pm\left[c + d\left(\frac{X_{\max}}{X} - 1\right)\right],$$

где X_{max} – предел измерений;

X - измеренное значение;

d = $\frac{a}{X_{\max}} \cdot 100\%$ - значение приведенной к пределу измерений аддитивной составляющей основной погрешности;

c = $\left(b + \frac{a}{X_{\max}} \right) \cdot 100\%$ - значение результирующей относительной основной погрешности в точке, соответствующей пределу измерений.

Рассмотренным выше способом (указанием численных значений c и d) нормируются, в частности, предельно-допустимые значения относительной основной погрешности цифровых измерительных приборов. В этом случае относительные погрешности каждого экземпляра средств измерений определенного типа не должны превышать установленных для этого типа средств измерений значений предельно-допустимой погрешности:

$$\delta \le \delta_{\max} = \pm \left[c + d \left(\frac{X_{\max}}{X} - 1 \right) \right].$$

При этом абсолютная основная погрешность определяется по формуле

$$\Delta \le \Delta_{\max} = \pm \frac{\delta_{\max} \cdot X}{100}.$$

Г) Нормирование дополнительных погрешностей.

Наиболее часто пределы допускаемых дополнительных погрешностей указывают в технической документации либо одним значением для всей рабочей области величины, влияющей на точность средства измерений (иногда несколькими значениями для поддиапазонов рабочей области влияющей величины), либо отношением предела допускаемой дополнительной погрешности к интервалу значений влияющей величины. Пределы допускаемых дополнительных погрешностей указываются на каждой, влияющей на точность средства измерений величине. При этом, как правило, значения дополнительных погрешностей устанавливают в виде дольного или кратного значения предела допускаемой основной погрешности. Например, в документации может быть указано, что при температуре окружающей среды за пределами нормальной области температур, предел допускаемой дополнительной погрешности, возникающей по этой причине, не должен превышать ± 0,2% на 10^{o} C.

Класс точности средства измерений – это его характеристика, отражающая точностные возможности средств измерений данного типа.

Допускается буквенное или числовое обозначение классов точности. Средствам измерений, предназначенным для измерения двух и более физических величин, допускается присваивать различные классы точности для каждой измеряемой величины. Средствам измерений с двумя или более переключаемыми диапазонами измерений также допускается присваивать два или более класса точности.

Если нормируется предел допускаемой абсолютной основной погрешности, или в различных поддиапазонах измерений установлены разные значения пределов допускаемой относительной основной погрешности, то , как правило, применяется буквенное обозначение классов. Так, например платиновые термометры сопротивления изготовляют с классом допуска **A** или классом допуска **B.**

При этом для класса **A** установлен предел допускаемой абсолютной основной погрешности

$$\Delta_{max} = (0{,}15 + 0{,}001 \cdot t_x),$$

а для класса **B**

$$\Delta_{max} = \pm(0{,}3 + 0{,}005 \cdot t_x),$$

где t_x – температура измеряемой среды.

Если для средств измерений того или иного типа нормируется одно значение предельно-допустимой приведенной основной погрешности, или одно значение предельно-допустимой относительной основной погрешности, или указываются значения **c** и **d**, то для обозначения классов точности используются десятичные числа. В соответствии с ГОСТом 8.401-80 для обозначения классов точности допускается применение следующих чисел:

$1 \cdot 10^n$; $1{,}5 \cdot 10^n$; $2 \cdot 10^n$; $2{,}5 \cdot 10^n$; $4 \cdot 10^n$; $5 \cdot 10^n$; $6 \cdot 10^n$, где n = 0, -1, -2, и т.д.

Для средств измерений с преобладающей аддитивной погрешностью численное значение класса точности выбирается из указанного ряда равным предельно-допустимому значению приведенной основной погрешности, выраженной в процентах. Для средств измерений с преобладающей мультипликативной погрешностью численное значение класса точности соответствует пределу допускаемой относительной основной погрешности также выраженной в процентах. Для средств измерений с соизмеримыми аддитивными и мультипликативными погрешностями числа **c** и **d** также выбираются из указанного выше ряда. При этом класс точности средства измерений обозначается двумя числами, разделенными косой чертой, например, 0,05/0,02. В этом случае **c** = 0,05% ; **d** = 0,02%. Примеры обозначений классов точности в документации и на средствах измерений, а также расчетные формулы для оценки пределов допускаемой основной погрешности приведены в таблице 4.

Примеры обозначений классов точности средств измерений и расчетные формулы для оценки пределов допустимой основной погрешности

Форма представления нормируемой основной погрешности	Примеры обозначения класса точности		Расчетные формулы для оценки пределов допускаемой основной погрешности	Примечания
	В документации	На средствах измерений		
Нормируется предел допускаемой абсолютной основной погрешности	Варианты: - класс **B**; - класс допуска **B;** - класс точности **B.**	**B**	$\Delta_{max} = \pm a$ или $\Delta_{max} = \pm(a + bx)$ $\delta_{max} = \pm\frac{a}{x}\cdot 100\%$ или $\delta_{max} = \pm\left(\frac{a}{x} + b\right)\cdot 100\%$	Значения **a** и **b** приводятся в документации на средство измерений.
Нормируется предел допускаемой приведенной основной погрешности	Варианты: - класс точности 1,5 - не обозначается.	**1,5**	$\Delta_{max} = \pm\frac{\gamma \cdot x_{max}}{100}$, $\gamma = 1{,}5\%$ $\delta_{max} = \pm\gamma \cdot \frac{x_{max}}{x}$, где x_{max} – предел измерений.	Для приборов с равномерной шкалой и нулевой отметкой в начале шкалы
	Варианты: - класс точности 2,5; - не обозначается		$\Delta l_{max} = \pm\frac{\gamma \cdot L}{100}$, $\gamma = 2{,}5\%$ Δl_{max} - предел допускаемой абсолютной погрешности в мм. L - длина всей шкалы.	Для приборов с неравномерной шкалой. Длина шкалы указывается в документации.
Нормируется предел допускаемой относительной основной погрешности	Класс точности 0,5.		$\delta_{max} = \pm b \cdot 100\% = \pm 0{,}5\%$ $\Delta_{max} = \pm\frac{\delta_{max} \cdot x}{100}$	Для средств измерений с преобладающей мультипликативной погрешностью.
	Варианты: - класс точности 0,02/0,01; -не обозначается.	**0,02/0,01**	$\delta_{max} = \pm\left[0{,}02 + 0{,}01\left(\frac{x_{max}}{x} - 1\right)\right]\%$ $\Delta_{max} = \pm\frac{\delta_{max} \cdot x}{100}$	Для средств измерений с соизмеримыми аддитивной и мультипликативной погрешностью

8 Погрешности измерений

При выполнении практических измерений важно оценить их точность. Термин «точность измерений» не имеет строго определения и используется для качественного сравнения измерительных операций. Для количественной оценки применяют термин «погрешность результата измерений». Оценка погрешности измерений одна из важнейших задач обеспечения единства измерений.

Для практических целей рассматривают систематические и случайные погрешности, выраженные в абсолютной, относительной или приведённой форме.

Абсолютная погрешность Δ – отклонение результата измерения x от действительного $x_д$ значения измеряемой величины, выраженное в единицах измерения (абсолютная погрешность может быть положительной или отрицательной):

$$\Delta = x - x_д . \qquad (6)$$

Относительная погрешность δ – отношение абсолютной погрешности к действительному значению измеряемой величины, выраженное в процентах:

$$\delta = \pm \frac{\Delta}{x_д} \cdot 100, \% . \qquad (7)$$

Приведённая погрешность γ – отношение абсолютной погрешности к нормирующему x_N значению, выраженное в процентах:

$$\gamma = \pm \frac{\Delta}{x_N} \cdot 100, \%. \qquad (8)$$

Нормирующее значение выбирают в зависимости от вида и характера шкалы прибора и принимают равным:

- конечному значению рабочей части шкалы, если нулевая отметка на краю или вне рабочей части шкалы;
- сумме конечных значений шкалы (без учёта знаков), если нулевая отметка внутри шкалы;
- номинальному значению, если прибор предназначен для измерения отклонения величины от номинального значения.

В практике измерений для определения действительного значения к показанию прибора вводят *поправку* c, которая численно равна абсолютной погрешности, взятой с обратным знаком:

$$\pm c = \mp \Delta . \qquad (9)$$

Поправку алгебраически складывают с результатом измерений:

$$x_д = x + (\pm c). \qquad (10)$$

В качестве действительного значения величины при многократных повторных измерениях принимают среднее арифметическое значение:

$$x_д = \bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i . \qquad (11)$$

Для оценки отклонения отдельных результатов измерения относительно среднего определяют средне квадратичное отклонение:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} . \qquad (12)$$

Доверительным интервалом $\pm\Delta_Г$ называют интервал, который с заданной вероятностью, называемой **доверительной вероятностью** $P_Д$ накрывает истинное значение измеряемой величины.

При определении доверительных интервалов необходимо, прежде всего, учитывать, что закон распределения погрешностей, получаемых при проведении многократных измерений, при числе измерений в серии меньше 30, описывается не нормальным законом распределения, а так называемым законом распределения Стьюдента. И, в этих случаях, величину доверительного интервала обычно оценивают по формуле:

$$\Delta_Г = t(P_Д, n)\cdot\sigma_{\bar{x}}, \qquad (13)$$

где $t(P_Д, n)$ - так называемый коэффициент Стьюдента.

В таблице Приложения Б приведены значения коэффициентов Стьюдента $t(P_Д, n)$ в зависимости от заданной доверительной вероятности и числа проведенных наблюдений n. При выполнении измерений обычно задаются доверительной вероятностью 0,95 или 0,99.

В зависимости от характера проявления, причин возникновения, и возможностей устранения различают разновидности погрешности:

- *систематическая* – остаётся постоянной или изменяется закономерно при повторных измерениях одного и того же параметра;

- *случайная* – изменяется случайным образом при повторных измерениях одного и того же параметра. Значение случайной погрешности заранее не известно, возникает из-за множества не уточнённых факторов, может быть уменьшено обработкой результатов измерений;

- *грубая (промах)* – возникает из-за ошибок оператора, неисправности СИ, резких изменений условий измерений. Грубые погрешности выявляют и устраняют в результате обработки результатов измерений.

Систематическая погрешность имеет составляющие:

- *субъективная* – составляющая систематической погрешности измерений, обусловленная индивидуальными особенностями оператора;

- *методическая* –составляющая систематической погрешности измерений, обусловленная несовершенством принятого метода измерений;

- *инструментальная* – составляющая погрешности измерения, обусловленная погрешностью применяемого средства измерений.

Систематическая погрешность может быть исключена или уменьшена за счёт устранения источников погрешности до начала измерений различными приемами (рандомизация, внесение известных поправок).

В ряде случаев определяют общую погрешность Δ_Σ как сумму систематической Δ_c и случайной Δ_0 погрешностей:

$$\Delta_\Sigma = \Delta_c + \Delta_0. \qquad (14)$$

В зависимости от изменения её величины погрешность измерения может быть:

- *аддитивная* – не изменяется во всём диапазоне измерения;

- *мультипликативная* – изменяется пропорционально измеряемой величине.

В большинстве случаев аддитивная и мультипликативная составляющие действуют одновременно.

В процессе эксплуатации СИ метрологические характеристики и параметры СИ претерпевают изменения. Эти изменения носят случайный монотонный или флуктуирующий характер и приводят к отказам. Важнейший параметр – *надёжность* - характеризует поведение СИ с течением времени и включает понятия:

- *стабильность* – способность сохранять МХ неизменными;

- *безотказность* – свойство непрерывно сохранять работоспособное состояния в течение некоторого времени;

- *долговечность* – возможность сохранения работоспособности до наступления предельного состояния;

- *ремонтопригодность* – приспособленность к поддержанию работоспособного состояния посредством технического обслуживания и ремонта;

- *сохраняемость* – свойство поддерживать показатели надёжности в течение и после хранения, транспортировки.

9 Правила округления и записи результата измерений

Нормирование пределов допустимых погрешностей средств измерений производится указанием значения погрешностей с одной или двумя значащими цифрами. По этой причине при расчете значений погрешностей измерений также должны быть оставлены только первые одна или две значащие цифры. Для округления используются следующие правила:

1. Погрешность результата измерения указывается двумя значащими цифрами, если первая из них более 2, и одной значащей цифрой, если первая из них 3 или более.

2. Показание прибора округляется до того же десятичного разряда, которым заканчивается округленное значение абсолютной погрешности.

3. Округление производится в окончательном ответе, промежуточные вычисления выполняют с одной-двумя избыточными цифрами.

Пример 1

- показание прибора 5,361 В;
- вычисленное значение абсолютной погрешности $\pm 0{,}284$ В;
- округленное значение абсолютной погрешности $\pm 0{,}26$ В;
- результат измерения $(5{,}36 \pm 0{,}26)$ В.

Пример 2

- показание прибора 35,67 мА;
- вычисленное значение абсолютной погрешности $\pm 0{,}541$ мА;
- округленное значение абсолютной погрешности $\pm 0{,}5$ мА;
- результат измерения $(35{,}7 \pm 0{,}5)$ мА.

Пример 3

- вычисленное значение относительной погрешности $\pm 1{,}268$ %;
- округленное значение относительной погрешности $\pm 1{,}3$ %.

Пример 4

- вычисленное значение относительной погрешности $\pm 0{,}367$ %;
- округленное значение относительной погрешности $\pm 0{,}4$ %.

10 Метрологическое обеспечение, службы и организации

Метрологическое обеспечение (МО) – установление и применение научных и организационных основ, технических средств, правил, норм, необходимых для достижения единства и требуемой точности измерений. Основная тенденция развития МО – переход от обеспечения единства и требований точности измерений к принципиально новой задаче обеспечения качества измерений.

Качество измерений – совокупность свойств СИ, обеспечивающих получение в установленный срок результатов измерения с требуемой точностью, достоверностью, правильностью, сходимостью и воспроизводимостью.

Точность измерения – степень близости результата измерения к истинному значению измеряемой величины.

Правильность измерения – степень близости систематической погрешности измерения к нулю.

Достоверность измерения – степень близости случайной погрешности к нулю.

Сходимость результатов измерения – близость результатов двух испытаний, полученных одним методом, на идентичных установках, в одной лаборатории.

Воспроизводимость результатов измерения – близость результатов двух испытаний, полученных в разных лабораториях.

МО имеет научную, организационную, нормативную и техническую составляющие. Разработка и проведение мероприятий МО возложено на МС.

Функции МО - обеспечение измерений, испытаний, контроля в целом а также параметров:

- технологических процессов, производств, организаций;
- продукции на всех стадиях её жизненного цикла.

Основные *задачи* МО:

- установление рациональной номенклатуры измеряемых параметров и оптимальных норм точности измерений при контроле качества продукции;
- технико-экономическое обоснование выбора СИ, установление их рациональной номенклатуры;
- стандартизация, унификация и агрегатирование применяемой контрольно-измерительной техники;
- поверка, метрологическая аттестация и калибровка контрольно-измерительного и испытательного оборудования;
- проведение метрологической экспертизы проектов нормативной, конструкторской и технологической документации;
- подготовка работников соответствующих служб предприятий к выполнению контрольно-измерительных операций.

Государственное управление деятельности по обеспечению единства измерений в России осуществляет Федеральное агентство РФ по техническому регулированию и метрологии, в ведении которой находятся организации:

- *Государственная метрологическая служба* (ГМС);
- *Государственная служба времени и частоты и определения параметров вращения земли* (ГСВЧ);
- *Государственная служба стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов* (ГССО);
- *Государственная служба стандартных справочных данных о физических константах и свойствах веществ и материалов* (ГСССД).

Основные задачи Федерального агентства РФ по техническому регулированию и метрологии в области метрологии:

- реализация государственной политики в сфере метрологии, установление и использование стандартов, эталонов, единиц величин;
- осуществление мер по защите прав потребителей и интересов государства в области контроля за соблюдением безопасности товаров (услуг);
- организация функционирования систем обеспечения единства измерений, аккредитации, сбора и анализа научно-технической информации;
- проведение государственного метрологического контроля;

Росстандарт сотрудничает с международными организациями по метрологии:

- *Международное бюро мер и весов* (МБМВ);
- *Генеральная конференция мер и весов* (ГКМВ);
- *Международный комитет мер и весов* (МКМВ);
- *Международная организация законодательной метрологии* (МОЗМ);
- *Международная конференция по измерительной технике и приборостроению* (ИМЕКО);

- *Международная организация по стандартизации* (ИСО) в составе технического комитета «Величины, единицы, обозначения и переводные множители»;

- *Международная электротехническая комиссия* (МЭК).

Проблемы метрологии в рамках СНГ решает Межгосударственный совет, созданный в соответствии с межправительственным документом «Соглашение о проведении согласованной политики в области стандартизации, метрологии и сертификации».

Государственная метрологическая служба (ГМС) – служба, которая несёт ответственность за метрологическое обеспечение измерений в стране на межотраслевом уровне и осуществляет государственный контроль и надзор. ГМС находится в подчинении Федерального агентства РФ по техническому регулированию и метрологии и имеет в своём составе:

- государственные научно-метрологические центры (ГНМЦ);

- территориальные органы ГМС.

Основные функции ГНМЦ:

- создание совершенствование, хранение, применение государственных эталонов единиц величин, сличение с международными эталонами;

- выполнение фундаментальных и прикладных научно - исследовательских и опытно-конструкторских работ в области метрологии;

- разработка и совершенствование научных, нормативных, организационных и экономических основ деятельности по метрологии;

- проведение государственных испытаний СИ;

- взаимодействие с метрологическими службами (МС) федеральных органов исполнительной власти, предприятий, организаций;

- информационное обеспечение предприятий и организаций по вопросам метрологии, подготовка и переподготовка.

Метрологические службы государственных органов управления РФ и юридических лиц – службы, создаваемые в соответствие с законом «Об обеспечении единства измерений» в органах государственного управления, на предприятиях и в организациях для реализации МО.

Создание МС обязательно в сферах государственного регулирования единства измерений перечисленных в приложении А.

МС юридических лиц - самостоятельные структурные подразделения, во главе с представителем администрации, аккредитованные органами Федеральной агентства РФ по техническому регулированию и метрологии. В состав МС входят калибровочные, поверочные лаборатории, подразделения по обслуживанию и ремонту СИ.

11 Формы государственного регулирования в области обеспечения единства измерений

Государственное регулирование в области обеспечения единства измерений осуществляется в следующих формах:

1) утверждение типа стандартных образцов или типа средств измерений;

2) поверка средств измерений;

3) метрологическая экспертиза;

4) государственный метрологический надзор;

5) аттестация методик (методов) измерений;

6) аккредитация юридических лиц и индивидуальных предпринимателей на выполнение работ и (или) оказание услуг в области обеспечения единства измерений.

12 Государственный метрологический надзор

Государственный метрологический надзор - контрольная деятельность в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, осуществляемая уполномоченными федеральными органами исполнительной власти и заключающаяся в систематической проверке соблюдения установленных законодательством Российской Федерации обязательных требований, а также в применении установленных законодательством Российской Федерации мер за нарушения, выявленные во время надзорных действий.

Государственный метрологический надзор осуществляется за:

- соблюдением обязательных требований в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений к измерениям, единицам величин, а также к эталонам единиц величин, стандартным образцам, средствам измерений при их выпуске из производства, ввозе на территорию Российской Федерации, продаже и применении на территории Российской Федерации;

- наличием и соблюдением аттестованных методик (методов) измерений;

- соблюдением обязательных требований к отклонениям количества фасованных товаров в упаковках от заявленного значения.

Государственный метрологический надзор распространяется на деятельность юридических лиц и индивидуальных предпринимателей, осуществляющих:

- измерения, относящиеся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений;

- выпуск из производства предназначенных для применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений эталонов единиц величин, стандартных образцов и средств измерений, а также их ввоз на территорию Российской Федерации, продажу и применение на территории Российской Федерации;

- расфасовку товаров.

Юридические лица и индивидуальные предприниматели, осуществляющие выпуск из производства предназначенных для применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений эталонов единиц величин, стандартных образцов и средств измерений, а также их ввоз на территорию Российской Федерации и продажу, обязаны уведомлять о данной деятельности федеральный орган исполнительной власти, осуществляющий функции по государственному метрологическому надзору, не позднее трех месяцев со дня ее осуществления. Порядок уведомления устанавливается федеральным органом исполнительной власти, осуществляющим функции по выработке государствен-

ной политики и нормативно-правовому регулированию в области обеспечения единства измерений.

Обязательные требования к отклонениям количества фасованных товаров в упаковках от заявленного значения при их расфасовке устанавливаются техническими регламентами. В технических регламентах также могут содержаться обязательные требования к оборудованию, используемому для расфасовки и контроля расфасовки, правила оценки соответствия отклонения количества фасованных товаров в упаковках от заявленного значения, обязательные требования к упаковке, маркировке или этикеткам фасованных товаров и правилам их нанесения.

Обязанность проведения проверок при осуществлении государственного метрологического надзора возлагается на должностных лиц федеральных органов исполнительной власти, осуществляющих государственный метрологический надзор, и их территориальных органов.

Должностные лица, проводящие проверку, при предъявлении служебного удостоверения и распоряжения федерального органа исполнительной власти, осуществляющего государственный метрологический надзор, о проведении проверки вправе:

- посещать объекты (территории и помещения) юридических лиц и индивидуальных предпринимателей в целях осуществления государственного метрологического надзора во время исполнения служебных обязанностей;

- получать документы и сведения, необходимые для проведения проверки.

Должностные лица, осуществляющие государственный метрологический надзор, обязаны:

- проверять соответствие используемых единиц величин единицам величин, допущенным к применению в Российской Федерации;

-проверять состояние и применение эталонов единиц величин, стандартных образцов и средств измерений в целях установления их соответствия обязательным требованиям;

-проверять наличие и соблюдение аттестованных методик (методов) измерений;

-проверять соблюдение обязательных требований к измерениям и обязательных требований к отклонениям количества фасованных товаров в упаковках от заявленного значения;

-проверять соблюдение установленного порядка уведомления о своей деятельности юридическими лицами и индивидуальными предпринимателями;

- соблюдать государственную, коммерческую, служебную и иную охраняемую законом тайну.

При выявлении нарушений должностное лицо, осуществляющее государственный метрологический надзор, обязано:

- запрещать выпуск из производства, ввоз на территорию Российской Федерации и продажу предназначенных для применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений стандартных образцов и средств измерений неутвержденных типов или предназначенных для применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений стандартных

образцов и средств измерений, не соответствующих обязательным требованиям (за исключением выпуска из производства и ввоза на территорию Российской Федерации стандартных образцов или средств измерений, предназначенных для проведения испытаний стандартных образцов или средств измерений в целях утверждения типа);

- запрещать применение стандартных образцов и средств измерений неутвержденных типов или стандартных образцов и средств измерений, не соответствующих обязательным требованиям, а также неповеренных средств измерений при выполнении измерений, относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений;

- наносить на средства измерений знак непригодности в случаях, когда средство измерений не соответствует обязательным требованиям;

- давать обязательные к исполнению предписания и устанавливать сроки устранения нарушений установленных законодательством Российской Федерации обязательных требований;

- в случаях, предусмотренных законодательством Российской Федерации, направлять материалы о нарушениях требований законодательства Российской Федерации об обеспечении единства измерений в судебные и следственные органы, а также в федеральный орган исполнительной власти, осуществляющий аккредитацию в области обеспечения единства измерений;

- применять иные меры в соответствии с законодательством Российской Федерации.

Форма знака непригодности средств измерений и порядок его нанесения устанавливаются федеральным органом исполнительной власти, осуществляющим функции по выработке государственной политики и нормативно-правовому регулированию в области обеспечения единства измерений.

Руководитель проверенного предприятия на основе акта проверки обязан утвердить сроки и план организационно-технических мероприятий по устранению выявленных нарушений.

13 Утверждение типа стандартных образцов или типа средств измерений

Утверждение типа стандартных образцов или типа средств измерений - документально оформленное в установленном порядке решение о признании соответствия типа стандартных образцов или типа средств измерений метрологическим и техническим требованиям (характеристикам) на основании результатов испытаний стандартных образцов или средств измерений в целях утверждения типа;

Тип стандартных образцов или тип средств измерений, применяемых в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, подлежит обязательному утверждению. При утверждении типа средств измерений устанавливаются показатели точности, интервал между поверками средств измерений, а также методика поверки данного типа средств измерений.

Государственные испытания СИ – обязательные испытания СИ в сферах распространения государственного метрологического контроля и надзора с последующим утверждением их типа.

Решение об утверждении типа стандартных образцов или типа средств измерений принимается федеральным органом исполнительной власти, осуществляющим функции по оказанию государственных услуг и управлению государственным имуществом в области обеспечения единства измерений, на основании положительных результатов испытаний стандартных образцов или средств измерений в целях утверждения типа.

Утверждение типа стандартных образцов или типа средств измерений удостоверяется свидетельством об утверждении типа стандартных образцов или типа средств измерений, выдаваемым федеральным органом исполнительной власти, осуществляющим функции по оказанию государственных услуг и управлению государственным имуществом в области обеспечения единства измерений. В течение срока действия свидетельства об утверждении типа средств измерений интервал между поверками средств измерений может быть изменен только федеральным органом исполнительной власти, осуществляющим функции по оказанию государственных услуг и управлению государственным имуществом в области обеспечения единства измерений.

На каждый экземпляр средств измерений утвержденного типа, сопроводительные документы к указанным средствам измерений и на сопроводительные документы к стандартным образцам утвержденного типа наносится знак утверждения их типа. Конструкция средства измерений должна обеспечивать возможность нанесения этого знака в месте, доступном для просмотра. Если особенности конструкции средства измерений не позволяют нанести этот знак непосредственно на средство измерений, он наносится на сопроводительные документы.

Испытания стандартных образцов или средств измерений в целях утверждения типа проводятся юридическими лицами, аккредитованными в установленном порядке в области обеспечения единства измерений.

Сведения об утвержденных типах стандартных образцов и типах средств измерений вносятся в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений.

Юридические лица и индивидуальные предприниматели, осуществляющие разработку, выпуск из производства, ввоз на территорию Российской Федерации, продажу и использование на территории Российской Федерации не предназначенных для применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений стандартных образцов и средств измерений, могут в добровольном порядке представлять их на утверждение типа стандартных образцов или типа средств измерений.

14 Поверка средств измерений

Поверка средств измерений (далее также - поверка) - совокупность операций, выполняемых в целях подтверждения соответствия средств измерений метрологическим требованиям.

Поверку проводят в соответствии с методиками поверки, требованиями, изложенными в соответствующих метрологических инструкциях. Основной МХ, определяемой при поверке, является погрешность, величина которой не должна превышать допустимое значение. При поверке чаще всего используют методы:

- непосредственного сравнения измеряемых величин и величин, воспроизводимых рабочими эталонами;

- непосредственного сличения показаний поверяемого и эталонного приборов при одновременном измерении одной и той же величины.

Поверка бывает первичная, периодическая, внеочередная, экспертная.

Первичная поверка – проводится при выпуске прибора.

Периодическая поверка – выполняется через определённые промежутки времени в процессе эксплуатации или хранения прибора.

Внеочередная проверка – проходит до наступления срока периодической после длительного хранения, повторной настройки, ударного воздействия.

Экспертная поверка – организуется органом ГМС при возникновении спорных ситуаций по МХ, исправности, пригодности СИ к применению.

Средства измерений, предназначенные для применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, до ввода в эксплуатацию, а также после ремонта подлежат первичной поверке, а в процессе эксплуатации - периодической поверке.

Требования к организации и проведению поверки СИ устанавливают правила ПР 50.2.006-94.

Применяющие средства измерений в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений юридические лица и индивидуальные предприниматели обязаны своевременно представлять эти средства измерений на поверку.

Поверку средств измерений осуществляют аккредитованные в установленном порядке в области обеспечения единства измерений юридические лица и индивидуальные предприниматели.

Правительством Российской Федерации устанавливается перечень средств измерений, поверка которых осуществляется только аккредитованными в установленном порядке в области обеспечения единства измерений государственными региональными центрами метрологии.

Результаты поверки средств измерений удостоверяются знаком поверки и (или) свидетельством о поверке. Конструкция средства измерений должна обеспечивать возможность нанесения знака поверки в месте, доступном для просмотра. Если особенности конструкции или условия эксплуатации средства измерений не позволяют нанести знак поверки непосредственно на средство измерений, он наносится на свидетельство о поверке.

Порядок проведения поверки средств измерений, требования к знаку поверки и содержанию свидетельства о поверке устанавливаются федеральным органом исполнительной власти, осуществляющим функции по выработке государственной политики и нормативно-правовому регулированию в области обеспечения единства измерений.

Сведения о результатах поверки средств измерений, предназначенных для применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, передаются в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений проводящими поверку средств измерений юридическими лицами и индивидуальными предпринимателями.

Средства измерений, не предназначенные для применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, могут подвергаться поверке в добровольном порядке.

Правила ПР 50.2.011-94 устанавливают порядок ведения в РФ *Государственного реестра СИ*, который предназначен для:

- учёта выданных сертификатов об утверждении типа СИ;
- создания централизованного информационного фонда о СИ, допущенных к производству, выпуску в обращение и применению в РФ;
- учёта типовых программ испытаний СИ;
- организации информационного обслуживания заинтересованных лиц.

15 Калибровка средств измерений

Калибровка (калибровочные работы) – совокупность операций, выполняемых с целью определения и подтверждения действительных значений МХ и пригодности к применению СИ, не подлежащего государственному надзору.

Для проведения калибровки создана *Российская система калибровки* (РСК) – совокупность субъектов деятельности и калибровочных работ, направленных на обеспечение единства измерений в сферах, не подлежащих государственному регулированию обеспечения единства измерений. Такие СИ могут в добровольном порядке подвергаться калибровке.

Основные направления деятельности РСК:

- регистрация органов, осуществляющих аккредитацию МС юридических лиц на право проведения калибровочных работ;
- установление основных принципов и правил РСК;
- аккредитация МС юридических лиц на право проведения калибровки;
- проведение калибровочных работ;
- установление основных принципов и правил РСК;
- организационное, методическое и информационное обеспечение РСК;
- инспекционный контроль за проведением калибровочных работ.

Калибровка средств измерений выполняется с использованием эталонов единиц величин, прослеживаемых к государственным первичным эталонам соответствующих единиц величин, а при отсутствии соответствующих государственных первичных эталонов единиц величин - к национальным эталонам единиц величин иностранных государств.

Выполняющие калибровку средств измерений юридические лица и индивидуальные предприниматели в добровольном порядке могут быть аккредитованы в области обеспечения единства измерений.

Результаты калибровки средств измерений, выполненной аккредитованными в установленном порядке в области обеспечения единства измерений юри-

дическими лицами или индивидуальными предпринимателями, могут быть использованы при поверке средств измерений в порядке, установленном федеральным органом исполнительной власти, осуществляющим функции по выработке государственной политики и нормативно-правовому регулированию в области обеспечения единства измерений.

Организации, проводящие калибровочные работы, должны иметь:

- поверенные средства калибровки – эталоны, установки, другие СИ, применяемые для передачи размера единиц калибруемым СИ;
- документы, регламентирующие организацию и проведение калибровочных работ;
- квалифицированный персонал, помещение, удовлетворяющее нормативным требованиям.

Результаты калибровки удостоверяют калибровочным знаком, наносимым на СИ, свидетельством о калибровке, записью в эксплуатационных документах.

16 Метрологическая экспертиза

Метрологическая экспертиза - анализ и оценка правильности установления и соблюдения метрологических требований применительно к объекту, подвергаемому экспертизе. Метрологическая экспертиза проводится в обязательном (обязательная метрологическая экспертиза) или добровольном порядке.

Содержащиеся в проектах нормативных правовых актов Российской Федерации требования к измерениям, стандартным образцам и средствам измерений подлежат обязательной метрологической экспертизе. Заключения обязательной метрологической экспертизы в отношении указанных требований рассматриваются принимающими эти акты федеральными органами исполнительной власти. Обязательная метрологическая экспертиза содержащихся в проектах нормативных правовых актов Российской Федерации требований к измерениям, стандартным образцам и средствам измерений проводится государственными научными метрологическими институтами.

Обязательная метрологическая экспертиза стандартов, продукции, проектной, конструкторской, технологической документации и других объектов проводится также в порядке и случаях, предусмотренных законодательством Российской Федерации. Указанную экспертизу проводят аккредитованные в установленном порядке в области обеспечения единства измерений юридические лица и индивидуальные предприниматели.

Порядок проведения обязательной метрологической экспертизы содержащихся в проектах нормативных правовых актов Российской Федерации требований к измерениям, стандартным образцам и средствам измерений устанавливается федеральным органом исполнительной власти, осуществляющим функции по выработке государственной политики и нормативно-правовому регулированию в области обеспечения единства измерений.

В добровольном порядке может проводиться метрологическая экспертиза продукции, проектной, конструкторской, технологической документации и дру-

гих объектов, в отношении которых законодательством Российской Федерации не предусмотрена обязательная метрологическая экспертиза.

17 **Анализ и оценка состояния измерений**

Анализ состояния измерений – анализ состояния измерений, испытаний и контроля на предприятии с целью установления соответствия достигнутого уровня МО определённым требованиям и разработка на этой основе предложений по его улучшению.

В процессе анализа устанавливают:

- влияние состояния измерений, контроля и испытаний на основные технико-экономические показатели деятельности предприятия;
- наличие и потребность в необходимых нормативных документах;
- оснащённость предприятия современным КИО и потребность в нём;
- состояние организационной структуры и деятельности МС, потребность в специалистах-метрологах;
- техническое и метрологическое состояние КИО, обеспеченность ремонтом, поверкой, калибровкой.

Работу по анализу состояния измерений на предприятии проводят под руководством МС федерального органа исполнительной власти, юридического лица. На предприятии анализ осуществляют добровольно с периодичностью раз в два года или в обязательном порядке при аттестации производства, сертификации систем качества, аккредитации испытательных и метрологических лабораторий. Результаты оформляют актом.

В случае необходимости установления соответствия условий выполнения измерений требованиям Российского законодательства в области обеспечения единства измерений проводят оценку состояния измерений по МИ 2427-97.

Эту оценку состояния измерений осуществляют для:

- установления соответствия достигнутого уровня метрологического обеспечения измерений современным требованиям;
- официального удостоверения наличия в лаборатории условий, необходимых для выполнения измерений (например, для получения лицензии на вид деятельности и т.п.).

При фиксировании в акте оценки наличия условий для выполнения измерений в закрепленной за лабораторией области деятельности, ответственные за проведение оценки, оформляет свидетельство о состоянии измерений на предприятии со сроком действия до 5 лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Практически во всех сферах деятельности человека интенсивно применяют результаты измерений, испытаний, исследований. Важность метрологической деятельности в стране подтверждена тем, что Федеральный закон Российской Федерации «Об обеспечении единства измерений», принят в пакете с законами «О защите прав потребителей». ФЗ «Об обеспечении единства измерений» устанавливает правовые основы обеспечения единства измерений в стране, регламентирует отношения государственных органов управления с юридическими и физическими лицами по вопросам, связанным с измерениями.

В экономически развитых странах расходы на операции, связанные с измерениями, достигают 15% затрат общественного труда. Перспективные направления развития метрологии составляют разработка принципиально новых средств измерений, улучшение метрологических характеристик и методик выполнения измерений, совершенствование эталонной базы. Широкое применение получают цифровые методы обработки результатов измерений. Намечен переход к эталонам единиц физических величин, основанным на квантовых эффектах. Такие эталоны не подвержены влиянию атмосферных условий, времени, географической широты местности.

Метрологические организации и службы Российской Федерации под руководством Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии ведут активную работу по совершенствованию законодательной базы метрологии.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Нормативно-правовые основы метрологии.
2. Физические свойства, величины. Измерение ФВ.
3. Системы единиц физических величин. Система SI.
4. Виды, методы измерений.
5. Средства измерений.
6. Метрологические характеристики СИ.
7. Погрешности измерений.
8. Метрологическое обеспечение, службы и организации.
9. Международные организации по метрологии.
10. Поверка, калибровка СИ.
11. Государственный метрологический надзор.
12. Государственные испытания, утверждение типа СИ.
13. Метрологическая экспертиза.
14. Анализ и оценка состояния измерений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.

1. Сергеев А.Г., Латышев М.В., Терегеря В.В. Метрология, стандартизация, сертификация: Учебное пособие. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Логос, 2010. – 560 с.: ил.

2. Лифиц И.М. Стандартизация, метрология и сертификация: Учебник. – 4-е изд., перераб. и доп. - М.: Юрайт-Издат, 2009. – 335 с.

3. Димов Ю.В. Метрология, стандартизация и сертификация. Учебник для вузов. 3-е изд. – СПб.: Питер, 2010. - 464 с.: ил.

4. Яблонский О.П., Иванова В.А. Основы стандартизации, метрологии, сертификации: Учебник. – Ростов на/Д: Феникс, 2010. – 448 с.

5. Радкевич Я.М., Лактионов Б.И., Схиртладзе А.Г Метрология, стандартизация и сертификация: Учеб. для вузов - 2-е изд., доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 791 с.

6. Крылова Г.Д. Основы стандартизации, сертификации, метрологии: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2001. – 711 с.

7. Никифоров А.Д., Бакиев Т.А. Метрология, стандартизация и сертификация: Учеб. пособие. – М.: Высш. Школа, 2002. – 422 с. : ил.

8. Басаков М.И. Сертификации продукции и услуг с основами стандартизации и метрологии: Учебное пособие. Издание 2-е, испр. и доп. – Ростов на /Д: издательский центр «МарТ», 2002. – 256 с.

9. Ранеев Г.Г., Тарасенко А.П. Методы и средства измерений: Учебник для вузов. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 336 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)

Сферы государственного регулирования обеспечения единства измерений

Сферы государственного регулирования обеспечения единства измерений распространяется на измерения, на которые установлены обязательные требования и которые выполняются при:

1) осуществлении деятельности в области здравоохранения;

2) осуществлении ветеринарной деятельности;

3) осуществлении деятельности в области охраны окружающей среды;

4) осуществлении деятельности по обеспечению безопасности при чрезвычайных ситуациях;

5) выполнении работ по обеспечению безопасных условий и охраны труда;

6) осуществлении производственного контроля за соблюдением установленных законодательством Российской Федерации требований промышленной безопасности к эксплуатации опасного производственного объекта;

7) осуществлении торговли и товарообменных операций, выполнении работ по расфасовке товаров;

8) выполнении государственных учетных операций;

9) оказании услуг почтовой связи и учете объема оказанных услуг электросвязи операторами связи;

10) осуществлении деятельности в области обороны и безопасности государства;

11) осуществлении геодезической и картографической деятельности;

12) осуществлении деятельности в области гидрометеорологии;

13) проведении банковских, налоговых и таможенных операций;

14) выполнении работ по оценке соответствия промышленной продукции и продукции других видов, а также иных объектов установленным законодательством Российской Федерации обязательным требованиям;

15) проведении официальных спортивных соревнований, обеспечении подготовки спортсменов высокого класса;

16) выполнении поручений суда, органов прокуратуры, государственных органов исполнительной власти;

17) осуществлении мероприятий государственного контроля (надзора).

К сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений относятся также измерения, предусмотренные законодательством Российской Федерации о техническом регулировании.

Сфера государственного регулирования обеспечения единства измерений распространяется также на единицы величин, эталоны единиц величин, стандартные образцы и средства измерений, к которым установлены обязательные требования.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(справочное)

Значения коэффициентов Стьюдента $t(P_Д, n)$.

Таблица А.1 - Значения коэффициентов Стьюдента $t(P_Д, n)$

n	$P_Д$							
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99
2	1,00	1,38	1,96	3,08	6,31	12,71	31,82	63,66
3	0,82	1,06	1,34	1,89	2,92	4,30	6,97	9,93
4	0,77	0,98	1,25	1,64	2,35	3,18	4,54	5,84
5	0,74	0,94	1,19	1,53	2,13	2,78	3,75	4,60
6	0,73	0,92	1,16	1,48	2,02	2,62	3,37	4,03
7	0,72	0,91	1,13	1,44	1,94	2,45	3,14	3,71
8	0,71	0,90	1,12	1,42	1,90	2,37	3,00	3,50
9	0,71	0,89	1,11	1,40	1,86	2,31	2,90	3,36
10	0,70	0,88	1,10	1,38	1,83	2,26	2,82	3,25
16	0,69	0,87	1,07	1,34	1,75	2,13	2,60	2,95
25	0,69	0,86	1,06	1,32	1,71	2,06	2,49	2,80

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебно-методическому комплексу
_____ С.А. Упоров

МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

МЕТРОЛОГИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ (КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ)

ЧАСТЬ 2

«СТАНДАРТИЗАЦИЯ»

Специальность
21.05.03 Технология геологической разведки

Автор: Глушкова Т.А., к.т.н.

Одобрен на заседании кафедры
Геофизики
(название кафедры)
Зав.кафедрой _____
(подпись)
Талалай А. Г.
(Фамилия И.О.)
Протокол № 1 от 05.10. 2020
(Дата)

Рассмотрен методической комиссией факультета
_____
(название факультета)
Председатель _____
(подпись)
Бондарев В. И.
(Фамилия И.О.)
Протокол № 2 от 13.10. 2020
(Дата)

Екатеринбург
2020

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ……..4
1 Правовые основы стандартизации…….....5
2 Основные понятия……...…5
3 Цели, задачи стандартизации…….…...7
4 Принципы стандартизации…….…...8
5 Национальный орган Российской Федерации по стандартизации……....9
6 Государственный контроль (надзор) за соблюдением требований технических регламентов…..……...11
7 Национальная система стандартизации……..…13
8 Международные, региональные организации по стандартизации……..…19
9 Информационное обеспечение стандартизации…….23
10 Работы по стандартизации……....24
ЗАКЛЮЧЕНИЕ……..…….29
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ…….……...29
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК…….…..29
Приложение А Перечень систем стандартов..…….…30
Приложение Б Нормативные документы по стандартизации……....31
Приложение В Общероссийские классификаторы…….33

ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития мирового сообщества характерен:

- высокими темпами интенсификации производства;
- применением широкого спектра машин, аппаратов, приборов, технологической оснастки, оборудования и инструмента;
- использованием широкой номенклатуры новых веществ, новейших материалов и современных технологий;
- применением локальных и глобальных информационных систем.
- расширением международных экономических и торговых связей.

В этих условиях в экономически развитых странах уделяют огромное внимание стандартизации как важнейшему направлению совершенствования технического уровня и качества продукции на всех стадиях её жизненного цикла - научные разработки, проектирование, производство, упаковка и маркировка, хранение, транспортировка, реализация, эксплуатация, утилизация.

Стандартизация охватывает разработку и применение норм, правил, которые отражают действие объективных технико-экономических законов и оказывают в государственном и мировом масштабах существенное позитивное влияние:

- развитие всех отраслей экономики;
- совершенствование управления экономикой и предприятиями;
- увеличение промышленного производства и рост ВВП;
- управление качеством продукции, квалификацией персонала;
- улучшение использования основных фондов, природных богатств;
- разработку и внедрение энергосберегающих, ресурсосберегающих, малоотходных технологий;
- состояние окружающей среды;
- расширение международных экономических связей и торговли.

Законодательную основу стандартизации в Российской Федерации составляют федеральные законы:

- «О защите прав потребителей» от 07.02.92;
- «Об обеспечении единства измерений» № 102-ФЗ от 26.06.2008;
- «О техническом регулировании» от 27.12.02;
- отраслевого характера в части, касающейся стандартизации.

Дальнейшее развитие экономики России связано с развитием промышленного производства, расширением международной торговли и экономического сотрудничества, увеличением количества и технического совершенства товаров, расширением спектра и повышением качества услуг на базе широкого применения международных и национальных стандартов.

Стандартизация - деятельность по установлению правил и характеристик в целях их добровольного многократного использования, направленная на достижение упорядоченности в сферах производства и обращения продукции и повышение конкурентоспособности продукции, работ или услуг.

1 Правовые основы стандартизации

Отношения в области стандартизации регулируют и обеспечивают законодательные, нормативные и другие акты РФ:

- Федеральный закон «О техническом регулировании»;
- закон РФ «О защите прав потребителей»;
- Федеральный закон РФ «Об обеспечении единства измерений»;
- федеральные законы отраслевого характера;
- указы Президента РФ;
- нормативные акты (постановления, распоряжения) Правительства РФ;
- подзаконные акты, направленные на решение социально - экономических задач, предусматривающих использование стандартизации;
- приказы национального органа РФ по стандартизации.

В целях усиления роли стандартизации в научно-техническом прогрессе, повышения качества продукции, экономии материально - энергетических ресурсов в РФ действует *система* Стандартизации в Российской Федерации.

Система – комплекс взаимоувязанных правил и положений, определяющих:

- цели и задачи стандартизации;
- структуру органов, подразделений по стандартизации, их права и обязанности;
- организацию и методику проведения работ по стандартизации во всех отраслях;
- порядок разработки, оформления, издания, внедрения стандартов и другой нормативно-технической документации, формы контроля их соблюдения.

ГОСТ Р 1.0-2004 Стандартизация в Российской Федерации. Основные положения.

ГОСТ Р 1.2-2004 Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты национальные Российской Федерации. Правила разработки, утверждения, обновления и отмены.

ГОСТ Р 1.4 -2004 Стандарты организаций. Общие положения.

ГОСТ Р 1.5 -2004 Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты национальные Российской Федерации. Правила построения, изложения, оформления и обозначения.

ГОСТ Р 1.8 -2004 Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты межгосударственные. Правила проведения в Российской Федерации работ по разработке, применению, обновлению и прекращению применения

ГОСТ Р 1.10 -2004 Стандартизация в Российской Федерации. Правила стандартизации и рекомендации по стандартизации. Порядок разработки, утверждения, изменения, пересмотра и отмены.

ГОСТ Р 1.12-2004 Стандартизация в Российской Федерации. Термины и определения.

2 Основные понятия

Гармонизация стандарта – приведение его содержания в соответствие с другим стандартом (региональным, международным).

Государственный стандарт (ГОСТ Р) – национальный стандарт, принятый федеральным органом исполнительной власти РФ по стандартизации или строительству.

Классификатор – документ, содержащий систематизированный перечень кодов и наименований объектов классификации и классифицированных группировок, разработанный и утверждённый в установленном порядке, обязательный для применения на различных уровнях.

Международный стандарт – стандарт, принятый международной организацией по стандартизации.

Методические инструкции (МИ) – нормативные документы методического содержания, разработанные организациями, подведомственными национальному органу по стандартизации.

Национальный стандарт – стандарт, утверждённый национальным органом по стандартизации.

Нормативный документ – документ, устанавливающий правила, общие принципы или характеристики, касающиеся различных видов деятельности или их результатов, подзаконный акт, принятый Правительством РФ.

Область стандартизации – совокупность объектов стандартизации.

Объект стандартизации – продукция, работа, процесс или услуга, для которой разрабатывают требования, характеристики, параметры или правила.

Правила (ПР) – нормативный документ, устанавливающий обязательные для применения организационные или общетехнические положения, порядки, методы выполнения работ, в том числе межгосударственные (ПМГ).

Проект стандарта – предлагаемый разработчиком проект нормативного документа, предназначенный для широкого обсуждения, голосования и принятия в качестве стандарта.

Региональный стандарт – стандарт, принятый региональной организацией по стандартизации и доступный широкому кругу пользователей.

Регламент – документ, содержащий обязательные правовые нормы, принятый органом исполнительной власти.

Рекомендации (Р) – нормативный документ, содержащий добровольные для применения организационные или общетехнические положения, порядки, методы выполнения работ, в том числе межгосударственные (РМГ).

Руководящие документы (РД) – нормативные документы методического содержания, разработанные организациями, подведомственными национальному органу по стандартизации.

Стандарт - документ, в котором в целях добровольного многократного использования устанавливаются характеристики продукции, правила осуществления процессов производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации продукции, условия выполнения работ или оказания услуг. Стандарт может со-

держать требования к терминологии, маркировке, этикеткам и правилам их нанесения.

Стандарт научно-технических, инженерных обществ (СТО) - стандарт, разработанный общественным объединением.

Технические условия (ТУ) - нормативный документ, устанавливающий технические требования, которым должна удовлетворять продукция, процесс или услуга.

Технический регламент (ТР) – документ, содержащий технические требования непосредственно или путём ссылки на стандарт, технические условия, либо путём включения содержания этих документов.

3 Цели, принципы, задачи стандартизации

Стандартизация как деятельность по установлению правил и характеристик в сферах производства и обращения продукции имеет общие и конкретные цели.

Стандартизация осуществляется *в целях:*

- повышение уровня безопасности жизни и здоровья граждан, имущества физических и юридических лиц, государственного и муниципального имущества, объектов с учетом риска возникновения чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, повышение уровня экологической безопасности, безопасности жизни и здоровья животных и растений;
- обеспечение конкурентоспособности и качества продукции (работ, услуг), единства измерений, рационального использования ресурсов, взаимозаменяемости технических средств (машин и оборудования, их составных частей, комплектующих изделий и материалов), технической и информационной совместимости, сопоставимости результатов исследований (испытаний) и измерений, технических и экономико-статистических данных, проведения анализа характеристик продукции (работ, услуг), исполнения государственных заказов, добровольного подтверждения соответствия продукции (работ, услуг);
- содействие соблюдению требований технических регламентов;
- создание систем классификации и кодирования технико-экономической и социальной информации, систем каталогизации продукции (работ, услуг), систем обеспечения качества продукции (работ, услуг), систем поиска и передачи данных, содействие проведению работ по унификации.

Конкретные цели стандартизации относят к:

- определённой области материальной, нематериальной деятельности;
- отрасли производства продукции, оказания услуг;
- предприятию, фирме;
- виду продукции.

4 Принципы стандартизации

Стандартизацию осуществляют в соответствии с *принципами*:

- добровольного применения стандартов;
- максимального учёта при разработке стандартов законных интересов заинтересованных лиц;

- применения международного стандарта как основы разработки национального стандарта, за исключением случаев, когда это невозможно вследствие несоответствия требований международных стандартов климатическим и географическим особенностям РФ, техническим и (или) технологическим особенностям или по иным основаниям, либо РФ выступала против принятия международного стандарта или отдельного его положения;

- недопустимости создания препятствий производству и обращению продукции, выполнению работ и оказанию услуг в большей степени, чем это минимально необходимо для выполнения целей стандартизации;

- недопустимости установления таких стандартов, которые противоречат требованиям ТР;

- обеспечения условий для единообразного применения стандартов.

5Документы в области стандартизации

К *документам по стандартизации*, используемым в РФ, относят:

- национальные стандарты;
- правила стандартизации;
- нормы и рекомендации в области стандартизации;
- применяемые в установленном порядке классификации, общероссийские классификаторы технико-экономической и социальной информации;
- стандарты организаций;
-своды правил.

Объектами национальных стандартов могут быть:

- характеристики продукции;
- правила выполнения технических документов;
- правила осуществления процессов постановки на производство, хранения, перевозок, реализации, утилизации;
- правила оказания услуг, выполнения работ;
- терминология в различных областях деятельности;
- требования к маркировке продукции и тары, способам упаковки;
- принципы, нормы, правила в области организации деятельности предприятий.

Объектами стандартов организаций могут быть:

- характеристики продукции;
- принципы, нормы, правила в области различных сторон деятельности предприятия, организации.

Важнейшие, перспективные задачи стандартизации:

- обеспечение взаимопонимания между разработчиком, изготовителем, продавцом и заказчиком, покупателем, потребителем;
- установление оптимальных требований к номенклатуре, качеству продукции в интересах потребителя, государства;
- определение требований по совместимости (конструктивной, электрической, электромагнитной, программной, информационной) и взаимозаменяемости продукции;

- унификация на основе применения параметрических и типоразмерных рядов, базовых конструкций, конструктивно-унифицированных узлов, блочно-модульных составных частей изделий;

- нормативное обеспечение межгосударственных и национальных социально - экономических и научно - технических проектов, инфраструктурных комплексов (транспорт, связь, информационные системы, оборона страны, охрана окружающей среды, безопасность населения);

- определение метрологических норм, правил, положений, требований;

- установление требований к современным ресурсосберегающим и малоотходным технологиям;

- создание и ведение систем классификации, кодирования;

- разработка, внедрение и ведение систем каталогизации для обеспечения потребителей информацией о номенклатуре и технических характеристиках товаров, услуг, процессов;

- содействие выполнению законодательства РФ средствами технического регулирования.

В зависимости от того, участники какого географического, экономического, политического региона мира принимают стандарт, различают уровни стандартизации:

- *международный*;
- *региональный*;
- *национальный*;
- *административно-территориальный*.

В мировом сообществе имеет место тенденция гармонизации национальных стандартов с международными стандартами, которая отвечает интересам экономически развитых и развивающихся стран.

5 Национальный орган Российской Федерации по стандартизации

Национальный орган по стандартизации – *Росстандарт (ранее Федеральное агентство Российской Федерации по техническому регулированию и метрологии, а до 2004 г. Госстандарт РФ)*, входящее в состав Министерства промышленности и энергетики РФ, - является органом государственной исполнительной власти по техническому регулированию, осуществляющим межотраслевую координацию и функциональное регулирование в области технического регулирования, стандартизации, оценки соответствия, метрологии.

В структуру *Росстандарта* входят управления:

- метрологии и надзора;
- технического регулирования и стандартизации;
- развития, информационного обеспечения и аккредитации;
- экономики, бюджетного планирования и госсобственности;
- международного и регионального сотрудничества.

Основные направления деятельности национального органа по стандартизации:

- научно-техническое;

- организационное;
- представительское.

Координацию работ по техническому регулированию, стандартизации, оценке соответствия в области строительства, архитектуры, производства строительных материалов и в жилищно-коммунальном хозяйстве осуществляет *Федеральное агентство Российской федерации по строительству и ЖКХ* (до 2004 г. Госстрой РФ).

Основные функции национального органа по стандартизации:
- утверждение национальных стандартов;
- принятие программ разработки национальных стандартов;
- обеспечение соответствия национальной системы стандартизации интересам экономики, состоянию материально-технической базы;
- содействие научно-техническому прогрессу;
- осуществление учёта национальных стандартов, правил стандартизации, норм и рекомендаций, обеспечение их доступности заинтересованным лицам;
- создание технических комитетов (ТК) по стандартизации и координация их деятельности;
- организация опубликования национальных стандартов, их распространение;
- участие в работе, представление прав и защита интересов РФ в международных организациях при создании международных стандартов;
- утверждение знака соответствия национальным стандартам.

Национальному органу по стандартизации предоставлены права:
- координации деятельности государственных органов управления, касающейся технического регулирования, стандартизации, оценки соответствия, метрологии;
- проведения государственного контроля (надзора) за соблюдением требований ТР;
- принятия мер по запрещению выпуска и реализации продукции, изготовленной с нарушением требований ТР;
- организации профессиональной подготовки и переподготовки кадров в области технического регулирования;
- издания научно-технических журналов, справочников и другой литературы по вопросам технического регулирования и управления качеством.

ТК - постоянный рабочий орган *Росстандарта* в области стандартизации, специализированный по объектам. В ТК на паритетных началах и добровольной основе входят представители:
- федеральных органов исполнительной власти;
- научных организаций, проектно-конструкторских учреждений;
- производственных предприятий, фирм;
- инженерных и научных обществ;
- объединений предпринимателей и обществ по защите прав потребителей.

Основные функции ТК:
- определение концепций развития стандартизации;
- составление проектов новых стандартов и обновление действующих;

- оказание научно-методической помощи организациям, разрабатывающим стандарты и применяющим нормативные документы;

- привлечение к деятельности по стандартизации союзов предпринимателей и обществ потребителей;

- проведение гармонизации отечественных стандартов с международными стандартами;

- подготовка обоснованных позиций РФ для голосования по проектам стандартов в международных организациях;

- проведение и участие в работе заседаний международных организаций по стандартизации.

Заседания ТК по стандартизации являются открытыми.

Материалы заседаний подлежат опубликованию в аналоговой форме (специальные печатные издания, средства массовой информации) и электронно-цифровой форме (цифровые информационные системы общего пользования), доступны для заинтересованных лиц.

6 Государственный контроль (надзор) за соблюдением требований технических регламентов

Государственный контроль (надзор) за соблюдением ТР осуществляют:

- федеральные органы исполнительной власти;

- органы исполнительной власти субъектов РФ;

- государственные учреждения, уполномоченные в соответствии с законодательством РФ;

- должностные лица органов государственного контроля (надзора);

- государственные инспекторы. Главный государственный инспектор – руководитель *Росстандарта*.

Государственный контроль (надзор) должностные лица осуществляют путём проведения плановых и внеплановых проверок. При составлении планов учитывают:

- целевые задания и приоритетные направления проверок;

- информацию потребителей, наличие рекламаций;

- сведения реестров о продукции, прошедшей сертификацию.

Объекты государственного контроля (надзора):

- продукция;

- процессы производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации.

Проведение проверок органы государственного контроля (надзора) осуществляют с применением правил и методов исследований (испытаний) и измерений, разработанных в соответствующих ТР.

Органы государственного контроля (надзора) имеют право:

- требовать от изготовителя (продавца) предъявления декларации о соответствии или сертификата соответствия требованиям ТР, если применение таких документов предусмотрено соответствующим ТР;

- осуществлять мероприятия государственного контроля (надзора) за соблюдением требований ТР в порядке, установленном законодательством;

- принимать мотивированное решение о запрете передачи продукции на реализацию, полном или частичном (в зависимости от характера обнаруженных нарушений) приостановлении процессов производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации, утилизации, если иными мерами невозможно устранить нарушения требований ТР;

- приостановить или прекратить действие декларации о соответствии или сертификата соответствия;

- привлекать изготовителя (исполнителя, продавца) к ответственности, предусмотренной законодательством РФ (если нарушения привели к причинению вреда здоровью человека, то к виновным может быть применено уголовное наказание, предусмотренное статьёй 238 УК РФ);

- принимать иные предусмотренные законодательством РФ меры в целях недопущения вреда.

Органы государственного контроля (надзора) обязаны:

- проводить в ходе мероприятий по государственному контролю (надзору) разъяснительную работу о техническом регулировании, информировать изготовителя (продавца) о существующих ТР;

- соблюдать коммерческую или иную охраняемую законом тайну;

- соблюдать порядок осуществления мероприятий по государственному контролю (надзору) и оформления результатов проверок;

- принимать на основании результатов проверок меры по устранению последствий нарушений требований ТР;

- направлять информацию о несоответствии продукции требованиям ТР изготовителю (продавцу), покупателю (потребителю).

Таким образом, в зависимости от характера нарушений изготовителем (продавцом) требований ТР орган государственного контроля (надзора) принимает решение:

- выдать предписания об устранении нарушения;

- запретить полностью или частично передачу продукции в обращение;

- приостановить или прекратить действие декларации о соответствии или сертификата соответствия.

За нарушение требований ТР, неисполнение предписаний органа государственного контроля (надзора) изготовитель (исполнитель, продавец) несёт ответственность в соответствии с законодательством РФ.

Если в результате несоответствия продукции требованиям ТР причинён вред жизни или здоровью граждан, имуществу физических или юридических лиц, государственному или муниципальному имуществу, окружающей среде, жизни или здоровью животных и растений или возникла угроза причинения такого вреда, то виновный обязан возместить причинённый вред и принять меры в целях недопущения такого вреда. Обязанность возместить причинённый вред не может быть ограничена договором или заявлением одной из сторон.

Изготовитель (исполнитель, продавец), которому стало известно о несоответствии выпущенной в обращение продукции требованиям ТР, обязан сообщить об

этом в орган государственного контроля (надзора) в течение десяти дней с момента получения такой информации.

Лица, которые не имеют отношения к изготовлению и реализации продукции (приобретатель, потребитель), вправе направлять информацию о несоответствии продукции требованиям ТР в орган государственного контроля (надзора) лично или письменно (индивидуально или коллективно).

Изготовитель (продавец) в течение десяти дней с момента получения информации о несоответствии продукции требованиям ТР обязан провести проверку достоверности полученной информации. При подтверждении достоверности полученной информации изготовитель (продавец) обязан:

- разработать программу мероприятий по предотвращению причинения вреда. Программа должна включать в себя мероприятия по информированию приобретателя о наличии угрозы причинения вреда;

- устранить недостатки, при необходимости объявить отзыв продукции. Устранение недостатков, отзыв продукции, доставка продукции к месту устранения недостатков и обратно осуществляет изготовитель (продавец);

- незамедлительно приостановить производство и реализацию продукции, отозвать продукцию и возместить приобретателю (потребителю) убытки в случае невозможности устранить причины причинения вреда.

В случае невыполнения изготовителем (продавцом) программы мероприятий по предотвращению причинения вреда орган государственного контроля (надзора), а также иные лица вправе обратиться в суд с иском о *принудительном отзыве продукции с рынка.* При удовлетворении иска суд обязывает ответчика совершить определённые действия по отзыву продукции с рынка и довести решение суда не позднее одного месяца со дня его вступления в силу до сведения приобретателя через средства массовой информации или иным способом.

В случае если ответчик (изготовитель, продавец) не исполнит решение суда в установленный срок, истец (приобретатель, потребитель) вправе совершить эти действия за счёт ответчика с взысканием с него расходов.

Орган по сертификации, аккредитованная испытательная лаборатория (центр), должностные лица, эксперты несут ответственность за выпуск в обращение продукции, не соответствующей требованиям ТР, в соответствии с законодательством РФ и договором о проведении сертификации.

7 Национальная система стандартизации

Основу национальной системы стандартизации РФ составляют:

- национальные стандарты;

- общероссийские классификаторы технико-экономической и социальной информации, правила их разработки и применения.

Национальные стандарты:

- разрабатываются в порядке, установленном законодательством РФ;

- утверждаются национальным органом по стандартизации в соответствии с правилами, нормами, рекомендациями в области стандартизации;

- применяются на добровольной основе.

Национальные стандарты применяются равным образом и в равной мере независимо от:

- страны и места происхождения продукции, осуществления процессов производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, выполнения работ и оказания услуг;
- видов или особенностей сделок и лиц, являющихся изготовителями, исполнителями, продавцами, приобретателями.

Применение национального стандарта подтверждается знаком соответствия национальному стандарту.

Общероссийские классификаторы:

- разрабатываются, принимаются, вводятся в действие, ведутся и применяются в порядке, установленном Правительством РФ;
- содержат технико-экономическую и социальную информацию, в том числе в области прогнозирования, статистического учёта, банковской деятельности, налогообложения;
- включают информацию в области межведомственного информационного обмена, создания информационных систем и ресурсов.

Национальный орган по стандартизации разрабатывает и утверждает программу разработки национальных стандартов, обеспечивает доступность программы заинтересованным лицам.

Порядок разработки и утверждения национальных стандартов установлен законодательством РФ.

Разработчиком национального стандарта может быть любое лицо.

Уведомление о разработке национального стандарта направляется в национальный орган по стандартизации и публикуется в печатном издании федерального органа исполнительной власти по техническому регулированию и в информационной системе общего пользования в электронно-цифровой форме. Уведомление должно содержать информацию о имеющихся в проекте национального стандарта положениях, отличающихся от положений соответствующих международных стандартов.

Разработчик дорабатывает проект национального стандарта с учётом полученных в письменной форме замечаний, проводит публичное обсуждение проекта, составляет перечень замечаний и результатов их обсуждения, публикует уведомление о завершении обсуждения. Срок публичного обсуждения проекта национального стандарта не может быть менее двух месяцев.

Проект национального стандарта одновременно с перечнем замечаний представляется разработчиком в технический комитет по стандартизации, который организует проведение экспертизы проекта, готовит мотивированное предложение об утверждении или отклонении проекта, предаёт перечень замечаний и результаты экспертизы в национальный орган по стандартизации.

Национальный орган по стандартизации на основании документов, представленных техническим комитетом, принимает решение об утверждении или отклонении национального стандарта. Уведомление об утверждении национального стандарта подлежит опубликованию в печатном издании национального органа по стан-

дартизации и информационной системе общего пользования в электронно-цифровой форме в течение одного месяца.

Работы по национальной стандартизации под руководством *Росстандарта* ведут:

- научно-исследовательские институты (НИИ);
- конструкторские бюро, опытно-экспериментальные базы НИИ;
- федеральные, региональные, областные центры по стандартизации и метрологии (ЦМС), по сертификации (РОСТЕСТ, г. Москва, УРАЛТЕСТ, г. Екатеринбург);
- конструкторско-технологические, научно-исследовательские подразделения (отделы, бюро, лаборатории, группы) по стандартизации на предприятиях.

НИИ национального органа РФ по стандартизации:

ВНИИКИ – Всероссийский НИИ классификации, терминологии и информации по стандартизации и качеству, г. Москва;

ВНИИ Стандарт – Всероссийский НИИ стандартизации, г. Москва;

ВНИИС – Всероссийский НИИ сертификации, г. Москва;

ВНИИНМАШ – Всероссийский НИИ стандартизации и сертификации в машиностроении, г. Москва;

ВНИИМС – Всероссийский НИИ метрологической службы, г. Москва;

ВНИЦСМВ – Всероссийский научно-исследовательский центр стандартизации, информации, сертификации сырья, материалов, веществ, г. Москва;

ВНИИМ им. Д.И.Менделеева – Всероссийский НИИ метрологии, г. Санкт-Петербург;

УНИИМ – Уральский НИИ метрологии, г. Екатеринбург.

В структуру национального органа РФ по стандартизации входят опытные заводы, издательство, типографии, магазины, учебные заведения. На базе территориальных представительств Национального органа РФ по стандартизации работают органы по оценке соответствия продукции и услуг, испытательные лаборатории, поверочные и калибровочные центры.

Подразделения по стандартизации на предприятиях осуществляют следующие функции:

- составляют годовые и перспективные планы работ по государственной и отраслевой стандартизации, передают их в головную организацию по стандартизации;
- проводят работы по стандартизации, унификации продукции и технологической оснастки;
- определяют технико-экономическую эффективность внедрения стандартов в проектирование и производство;
- осуществляют систематический контроль внедрения и соблюдения стандартов, технических условий при проектировании и производстве продукции;
- пересматривают устаревшие, разрабатывают новые стандарты предприятий и технические условия.

Другие субъекты хозяйственной деятельности (научно-технические общества, инженерные общества) создают в своей структуре специальные подразделения, занимающиеся разработкой нормативно-технической документации по стандартизации и управлению качеством.

Совершенствование стандартизации на предприятиях позволяет:

- улучшить организацию и культуру производства;
- увеличить производительность оборудования и производительность труда персонала;
- улучшить качество конструкторской документации;
- повысить качество, снизить себестоимость продукции;
- сократить номенклатуру материалов, полуфабрикатов, комплектующих.

В зависимости от того, участники какого субъекта деятельности разрабатывают и принимают стандарт, различают *категории* стандартов:

- *стандарты международные* (ИСО);
- *стандарты государственные* (ГОСТ Р);
- *технические условия* (ТУ);
- *стандарты общественных объединений, научно-технических и инженерных обществ* (СТО).

Международный стандарт – стандарт, который разрабатывает и выпускает международная организация по стандартизации с целью содействия взаимному сотрудничеству в интеллектуальной, научно-технической, экономической деятельности, в области охраны окружающей среды и в торговле. Например, основополагающий стандарт ИСО 14001 «Системы управления в области охраны окружающей среды. Руководство по применению». Стандарты ИСО имеют рекомендательный характер. Национальный орган РФ по стандартизации допускает применение стандартов ИСО:

- в качестве ГОСТ Р без изменений в тексте;
- с дополнениями, учитывающими российские требования, например, государственный стандарт ГОСТ Р/ИСО 14001 «Системы управления качеством окружающей среды. Общие требования и рекомендации по использованию».

Национальный стандарт – стандарт разрабатываемый для всех предприятий, организаций, учреждений страны независимо от форм собственности и подчинения, граждан занимающихся индивидуальной трудовой деятельностью, министерств (ведомств), органов местного и государственного управления РФ. Разработку ГОСТ Р ведут ТК по стандартизации в составе *Росстандарта*. После утверждения *Росстандарта* присваивают индекс, в котором указан номер и год утверждения или пересмотра - четыре последние цифры (например, государственный стандарт ГОСТ Р 51685-2000 на геометрические размеры железнодорожных рельсов).

Объектами ГОСТ Р являются:

- организационно-методические и общетехнические объекты;
- совместимые программные и технические средства информационных технологий;
- справочные материалы, классификация и кодирование информации;
- составляющие элементы крупных народно-хозяйственных комплексов (транспорт, энергосистема, связь, оборона, охрана окружающей среды);
- содержание государственных научно-технических и социально-экономических целевых программ и проектов;
- продукция для удовлетворения внутренних потребностей населения и поставок на экспорт;

- достижения науки и техники, позволяющие предприятию, государству обеспечить конкурентоспособность продукции;

- система конструкторской и технологической документации, документация в области управления и организации производства.

Технические условия – нормативный документ, который содержит технические требования, определяющие показатели качества продукции в соответствии с условиями её эксплуатации, обслуживания, ремонта. ТУ разрабатывают и применяют субъекты хозяйственной деятельности независимо от форм собственности и подчинения, когда ГОСТ и ОСТ создавать нецелесообразно, или необходимо дополнить или ужесточить установленные ими требования (например, нормативный документ ТУ 14-2Р-351-2001 на технические требования в отношении стальных колец для автомобильных, башенных кранов и других машин). Объектом ТУ может быть продукция разовой поставки, выпускаемая малыми партиями, а также произведения художественных промыслов. В случае, когда на ТУ нет ссылок в контрактах или договорах, ТУ считается не нормативным, а техническим документом.

Стандарты общественных объединений, научно-технических и инженерных обществ – нормативные документы, которые содержат требования к принципиально новым видам продукции, методам измерений, нетрадиционным технологиям и принципам управления производством. СТО разрабатывают и утверждают общественные объединения с целью распространения перспективных результатов научно-технических исследований (например, стандарт СТО АСЧМ 20-93 Ассоциации «Черметстандарт» на сортамент профилей двутавровых широкополочных балок с параллельными гранями полок).

В зависимости от характера объектов стандартизации различают *виды* стандартов:

- *стандарты основополагающие*;

- *стандарты на продукцию, услуги*;

- *стандарты на процессы*;

- *стандарты на методы контроля (испытаний, измерений, анализа).*

Основополагающие стандарты – стандарты, которые устанавливают организационные принципы, положения, требования, правила и нормы, имеющие общий характер, с целью содействия взаимопониманию, взаимодействию и техническому единству в различных областях науки, техники и производства. Основополагающие стандарты объединяют взаимосвязанные стандарты, имеющие общую целевую направленность, имеют комплексный характер (ЕСКД, ЕСТД).

Стандарты на продукцию, услуги – стандарты, которые устанавливают требования к группам однородной продукции, услуг или конкретной продукции, услугам (стандарты общих технических требований, параметров и размеров, типов конструкции, сортамента, правил приёмки).

Стандарты на работы (процессы) – стандарты, которые устанавливают требования к конкретным видам работ (процессов), осуществляемым на разных стадиях жизненного цикла продукции: разработка, проектирование, производство, эксплуатация, потребление, хранение, транспортирование, обслуживание, ремонт, утилизация.

Особое место занимают экологические требования, которые включают: условия применения потенциально опасных для окружающей среды материалов, параметры очистного оборудования, правила выбросов в атмосферу и сточные воды.

Стандарты на методы контроля (испытаний, измерений, анализа) - стандарты, которые устанавливают порядок отбора проб (образцов) для испытаний, методы контроля (испытаний, измерений, анализа) характеристик определённой группы продукции с целью обеспечить единство оценки показателей качества. Критерии объективности метода контроля – сходимость и воспроизводимость результатов. Стандартизации подлежат: средства контроля, порядок подготовки и проведения контроля, правила обработки результатов, допустимая погрешность метода. В стандартах предусмотрены различные виды испытаний: повседневные, типовые, периодические.

8 Международные, региональные организации по стандартизации

Главная международная организация по стандартизации ИСО создана в 1946г. СССР был одним из основателей организации, является постоянным членом руководящих органов. РФ входит в ИСО как правоприемник СССР.

Цель деятельности ИСО:

- содействие развитию стандартизации в мировом масштабе для облегчения международного товарообмена и взаимопомощи, расширение сотрудничества в области интеллектуальной, научной, технической и экономической деятельности.

Практическая деятельность ИСО направлена на:

- облегчение координации и унификации национальных стандартов;
- подготовку рекомендаций национальным организациям по стандартизации;
- разработку стандартов ИСО;
- организацию обмена информацией в области стандартизации;
- сотрудничество с другими международными организациями по стандартизации и смежным проблемам (сертификация, метрология).

Объекты стандартизации ИСО:

- основополагающие стандарты;
- машиностроение, химия;
- неметаллические материалы, руды, металлы;
- информационная техника;
- сельское хозяйство;
- строительство, специальная техника;
- охрана здоровья, медицина;
- окружающая среда;
- упаковка и транспортировка товаров.

Организационно в ИСО входят руководящие и рабочие органы.

Руководящие органы - Генеральная ассамблея, Совет, комитеты Совета, Технические бюро.

Рабочие органы - технические комитеты, подкомитеты, технические консультативные группы.

Совет руководит работой ИСО в перерывах между сессиями Генеральной ассамблеи. Решение принимается большинством голосов членов Совета. Совету ИСО подчиняются комитеты:

- *ПЛАКО* – техническое бюро по планированию и организации работы;
- *СТАКО* – комитет по изучению научных принципов стандартизации;
- *КАСКО* – комитет по оценке соответствия продукции, услуг;
- *ИНФКО* – комитет по научно-технической информации, в рамках которого функционирует информационная система *ИСОНЕТ* о документах в области стандартизации - стандартах, справочниках, учебной литературе;
- *ДЕВКО* – комитет по оказанию помощи развивающимся странам;
- *КОПОЛКО* – комитет по защите интересов потребителей;
- *РЕМКО* – комитет по стандартным образцам (эталонам).

По своему содержанию только 20% стандартов ИСО относятся к конкретной продукции. Остальные нормативные документы касаются требований безопасности, взаимозаменяемости, технической и информационной совместимости, методов испытаний, других общих и методических вопросов.

Международные стандарты ИСО, которых разработано более 10 тыс., не имеют статуса обязательных. Каждая страна – участница вправе решать вопрос о применении международных стандартов в зависимости от степени участия страны в международном разделении труда, состояния экономики и внешней торговли. В РФ принято около половины стандартов ИСО.

Главная международная организация по стандартизации и сертификации в области электротехники Международная электротехническая комиссия МЭК создана в 1906 г. Россия участвует в работе МЭК с 1921 г. Организационная структура МЭК во многом аналогична структуре ИСО.

Основная цель деятельности МЭК:

– содействие международному сотрудничеству по стандартизации и смежным с ней проблемам (испытания, оценка соответствия) в области электротехники, радиотехники, производства электротехнических материалов путём разработки международных стандартов и других документов.

Объекты стандартизации МЭК:

- материалы для электротехнической промышленности;
- электротехническое, электроэнергетическое оборудование;
- изделия электронной промышленности, электроинструмент;
- оборудование для спутников связи;
- терминология.

МЭК разработано более 2 тыс. стандартов. В РФ принято более половины стандартов МЭК

Международные стандарты МЭК можно разделить на два вида:

- общетехнические, носящие общеотраслевой характер, - нормативные документы на терминологию, стандартные напряжения и частоты, виды и методы испытаний, требования по безопасности;
- на конкретные виды продукции от бытовых электроприборов до спутников связи

Некоторые виды работ по международной стандартизации и сертификации ведут совместно ИСО и МЭК, а директивы имеют индекс ИСО/МЭК, например, Руководство 2 ИСО/МЭК «Общие термины и определения в области стандартизации и смежных видов деятельности».

Важнейшей целью при разработке стандартов ИСО/МЭК является разработка стандартов в области безопасности, разработка стандартов, содержащих наряду с техническими требованиями, требования по безопасности. Нормы безопасности зависят от уровня социально-экономического развития и образованности общества.

В сферу деятельности МЭК входит поиск методов защиты от различных видов опасностей:

- травмоопасность, опасность поражения электрическим током;
- техническая опасность, пожаро- и взрывоопасность;
- химическая и биологическая опасность;
- опасность излучений (звуковые, инфракрасные, радиочастотные, ультрафиолетовые, ионизирующие, радиационные).

Особый статус имеет Международный специальный комитет по радиопомехам (СИСПР), который занимается стандартизацией методов измерения радиопомех, излучаемых электронными и электротехническими приборами.

Организационно-методическую и практическую работу по стандартизации и оценке соответствия во взаимодействии с ИСО, МЭК в своих географических районах и областях деятельности ведут:

- Европейская экономическая комиссия ООН (ЕЭК ООН);
- Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН (ФАО);
- Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ);
- «Кодекс Алиментариус» - комиссия по разработке стандартов на продовольствие;
- Европейский комитет по стандартизации (СЕН);
- Европейский комитет по стандартизации в электротехнике (СЕНЭЛЕК);
- Европейский институт по стандартизации в области электросвязи (ЕТСИ);
- Межскандинавская организация по стандартизации (ИНСТА);
- Международная ассоциация стран Юго-Восточной Азии (АСЕАН);
- Панамериканский комитет стандартов (КОПАНТ).

Стандартизация, сертификация и метрология в рамках СНГ осуществляется в соответствии с межправительственным соглашением «Соглашение о проведении согласованной политики в области стандартизации, метрологии и сертификации» от 1992 г. Перспективная приоритетная задача Межгосударственного Совета СНГ - развитие сотрудничества с ИСО, МЭК, СЕН.

Активное участие в работе международных и региональных организаций по стандартизации принимают национальные организации экономически развитых государств.

Национальная организация по стандартизации и смежным с ней проблемам в США – Национальный институт стандартов и технологии (NIST) – неправительственная некоммерческая организация, утверждающая национальные стандарты, координирующая работы по разработке и применению стандартов в государственном и частном секторах экономики.

Федеральные стандарты в США разрабатывают:

- Американское общество по испытаниям и материалам (ASTM);
- Американское общество по контролю качества (ASQC);
- Американское общество инженеров – механиков (ASME);
- Общество инженеров – автомобилестроителей (SAE);
- Институт инженеров по электротехнике и электронике (IEEE) и другие организации и фирмы.

Основные задачи разработки и внедрения национальных стандартов в США - экономия энергоресурсов, защита окружающей среды, обеспечение безопасности людей и условий производства.

Национальная организация по стандартизации и смежным с ней проблемам в Британии – Британский институт стандартов (BSI) – независимая организация, координирующая деятельность по стандартизации, управлению качеством и сертификации, информационному обслуживанию и маркетингу, созданная для удовлетворения потребностей обществ инженеров-механиков, инженеров-судостроителей, инженеров-электриков и инженеров-металлургов. Приоритетные направления деятельности BSI – стандартизация в электротехнике, автоматизации, информационной технике, строительстве, химии, здравоохранении, машиностроении. Современное направление - обеспечение безопасности инвалидов, техническая помощь британским фирмам – экспортёрам.

Национальная организация по стандартизации во Франции – Французская ассоциация по стандартизации (ANFOR) – организация, координирующая деятельность по стандартизации, сертификации, метрологии, управлению качеством. Приоритетные направления деятельности в международной стандартизации – информационные технологии, в европейской стандартизации - транспорт и телекоммуникации, в национальной стандартизации – экология, безопасность, агропромышленное производство, а также сфера услуг.

Национальная организация по стандартизации в Германии – Немецкий институт стандартов (DIN). Деятельность DIN финансируется на основе договоров с заинтересованными сторонами – заказчиками нормативных документов и дотациями со стороны государства. Особое внимание уделяется стандартизации в области обеспечения безопасности товаров и услуг, защиты окружающей среды, созданию основополагающих стандартов. Кроме стандартизации DIN занимается проблемами оценки соответствия и информационного обеспечения стандартизации и сертификации.

Национальная организация по стандартизации в Японии – Японский комитет промышленных стандартов (JISC) - консультативный орган при Министерстве внешней торговли и промышленности. Деятельность JISC финансирует правительство Японии. На основании Закона о промышленной стандартизации в Японии производится сертификация промышленной продукции на соответствие национальному стандарту. Разрешение на выдачу сертификата и право маркировки знаком соответствия стандарту даёт министр отрасли по результатам инспекционного контроля качества данной продукции и аттестации предприятия.

Приоритетные направления стандартизации в Японии – учёт интересов зарубежных партнёров, придание открытого характера информации о стандартизации,

гармонизация японских национальных стандартов с международными стандартами, упрощение процедур сертификации, распространение стандартизации на продукцию предприятий частного сектора. Большое внимание уделяется стандартам, направленным на защиту окружающей среды, решение социальных проблем, создание условий для справедливой конкуренции, сохранение лидерства в области стандартизации в Азиатско-Тихоокеанском регионе.

9 Информационное обеспечение стандартизации

Национальному органу по стандартизации – *Росстандарту* - предоставлено исключительное право опубликования официальной информации:

- реестра продукции и услуг, сертифицированных и маркированных знаками соответствия и обращения на рынке;
- российских, международных, региональных, национальных нормативных документов.

Национальный орган РФ по стандартизации ведёт *Федеральный фонд стандартов* – совокупность нормативных документов по стандартизации, метрологии, оценке соответствия. В фонд входят:

- нормативные акты РФ по стандартизации, сертификации, метрологии;
- государственные реестры;
- государственные стандарты, их проекты;
- правила, рекомендации в области стандартизации;
- стандарты отраслей, предприятий, научно-технических и инженерных обществ, общественных организаций;
- общероссийские классификаторы технико-экономической и социальной информации;
- международные договоры, нормативные документы, принятые международными, региональными, национальными организациями зарубежных стран.

Головная организация по информационному обеспечению стандартизации - ВНИИКИ - Всероссийский НИИ классификации, терминологии и информации по стандартизации и качеству. ВНИИКИ совместно с другими НИИ и ЦМС ведёт автоматизированный банк отечественных, международных, региональных, зарубежных стандартов и нормативных документов по управлению качеством.

ВНИИКИ исполняет функцию национального центра международной информационной сети по стандартизации ИСОНЕТ, руководство деятельностью которой осуществляет Комитет по информационным системам и услугам ИНФКО, входящий в Совет ИСО.

Развитие информационных технологий повысило актуальность классификаций и кодирования информации. В РФ создана *Единая система классификации и кодирования технико-экономической и социальной информации* (ЕСКК), объектами которой выступают:

- статистическая информация;
- макроэкономическая, финансовая, правоохранительная деятельность;
- банковское дело, бухгалтерский учёт;
- стандартизация, оценка соответствия;

- производство продукции, предоставление услуг;
- торговля, таможенное дело;
- внешнеэкономическая деятельность.

Составляющие ЕСКК:

- общероссийские классификаторы технико-экономической и социальной информации, средства их ведения;
- нормативные, методические документы по их разработке, ведению и применению.

Национальный орган РФ по стандартизации принял более 20, в стадии внедрения находятся более 25 общероссийских классификаторов, гармонизированных с международными стандартами и классификациями.

Действующие общероссийские классификаторы:

- *ОКПО* – предприятий и организаций;
- *ОКОГУ* – органов государственной власти и управления;
- *ОКЭР* – экономических районов;
- *ОКДП* – видов экономической деятельности, продукции и услуг;
- *ОКСО* – специальностей по образованию;
- *ОКЗ* – занятий;
- *ОКУД* – управленческой документации;
- *ОКП* – продукции;
- *ОКС* – стандартов;
- *ОКПДТР* – профессий рабочих, должностей служащих, тарифных разрядов;
- *ОКОФ* – основных фондов;
- *ЕСКД* – изделий и конструкторских документов в машиностроении;
- *ОКЕИ* – единиц измерения;
- *ОКСВНК* – специальностей высшей научной квалификации.

Национальные стандарты, общероссийские классификаторы и информация об их разработке должна быть доступна заинтересованным лицам. Издательство национального органа РФ по стандартизации выпускает широкий спектр наименований печатной продукции – стандарты, нормативные документы, справочники, журналы с приложениями, учебная литература.

10 Работы по стандартизации

Работы, выполняемые при стандартизации, в условиях современного производства способствуют:

- совершенствованию организации и управления производством;
- повышению производительности оборудования и персонала;
- улучшению проектирования и изготовления продукции, особенно при крупносерийном, массовом производстве;
- ускорению разработки наукоёмких, малоотходных технологий;
- повышению стабильности качества товаров, работ и услуг;
- экономии ресурсов всех видов – материальных, энергетических, временных, людских;
- развитию безотходных технологий и защите окружающей среды.

Основные работы (методы стандартизации), выполняемые при стандартизации:

- систематизация объектов, явлений или понятий;
- кодирование и классификация технико-экономической информации;
- унификация и симплификация деталей, сборочных единиц, узлов, агрегатов, машин, приборов;
- типизация конструкций изделий и технологических процессов;
- агрегатирование машин и других изделий.

Систематизация объектов, явлений или понятий – расположение объектов в определённом порядке и последовательности, образующей чёткую систему, удобную для пользования. Простейшие формы систематизации – расположение объектов в алфавитном или хронологическом порядках.

Кодирование – присвоение по определённым правилам объекту кода, в виде сочетания цифр и букв. Коды обеспечивают идентификация объектов с помощью минимального количества знаков. Автоматизированные системы управления отраслями промышленности с применение вычислительной техники позволяют обрабатывать большой объём информации, закодированной в десятичных цифровых кодах.

Классификация – разделение множества объектов на классификационные группировки по сходству или различию на основе определённых признаков в соответствии с принятыми правилами.

Наибольшее применение получил *иерархический* метод классификации, в котором исходное множество объектов последовательно разделяется на подмножества (классы, группы, виды) по принципу от общего к частному. Основная сложность при построении классификации – выбор системы признаков, определение порядка их следования. Иерархическая классификация логична, проста, но плохо поддаётся автоматизированной обработке.

Фасетный метод классификации подразделяет объекты на независимые подмножества, обладающие определёнными признаками, необходимыми для решения конкретных задач. Принцип построения фасетной классификации – от частного к общему. Такая классификация хорошо поддаётся автоматизированной обработке.

Порядок проведения работ по классификации и кодированию информации регламентирован Единой системой классификации и кодирования технико-экономической информации *ЕСКК ТЭИ*. На основе Единой системы разрабатывают классификаторы (общероссийский, отраслевой, предприятия). Классификатор по статусу приравнен стандарту соответствующего уровня.

Унификация – приведение объектов одинакового функционального назначения к единообразию по установленному признаку и рациональное сокращение числа этих объектов. Унификация (заводская, отраслевая, межотраслевая) устанавливает минимально необходимое но достаточное число типов, видов, типоразмеров, изделий, сборочных единиц и деталей, обладающих высоким качеством и полной взаимозаменяемостью.

Симплификация – форма стандартизации, при которой уменьшают количество типов изделий до величины, достаточной для удовлетворения существующих в данное время потребностей.

Типизация конструкций изделий – разработка и установление типовых конструкций, содержащих конструктивные параметры общие для изделий, сборочных единиц, деталей.

Типизация технологических процессов – разработка и установление технологического процесса, для производства однотипных деталей или сборки однотипных составных частей или изделий.

Агрегатирование – создание машин, оборудования, приборов и других изделий из унифицированных стандартных агрегатов (автономных сборочных единиц), устанавливаемых в изделии в различном числе и комбинациях. Из минимального числа типоразмеров автономных агрегатов стремятся создать максимальное число компоновок оборудования.

Принципы, определяющие современную научно-техническую организацию работ по стандартизации:

- *системности;*
- *обеспечения функциональной взаимозаменяемости стандартизируемых изделий;*
- *научно-исследовательский;*
- *предпочтительности;*
- *прогрессивности и оптимизации стандартов;*
- *взаимоувязки стандартов;*
- *минимального удельного расхода материалов.*

Принцип системности - применение совокупности взаимосвязанных элементов, функционирование которых приводит к выполнению поставленной цели с максимальной эффективностью и наименьшими затратами. Научно-технический прогресс вызвал необходимость системного подхода к процессу производства, включающего труд людей, средства (оборудование, оснастка, инструмент, средства контроля) и предметы труда (продукция на стадиях её создания и использования).

Принцип обеспечения функциональной взаимозаменяемости стандартизируемых изделий – обеспечение взаимозаменяемости по эксплуатационным показателям. Принцип является главным при комплексной и опережающей стандартизации изделий.

Научно-исследовательский принцип разработки стандартов – проведение специальных теоретических, экспериментальных и опытно-конструкторских работ для подготовки проектов стандартов.

Принцип предпочтительности – установление нескольких рядов значений стандартизируемых параметров, чтобы при их выборе первый ряд предпочесть второму, второй – третьему. Широкое применение получили ряды предпочтительных чисел, построенные по принципу геометрической прогрессии. Принцип является теоретической базой современной стандартизации, позволяет повысить уровень взаимозаменяемости, уменьшить номенклатуру типоразмеров заготовок, деталей, изделий, создаёт условия эффективной специализации и кооперирования в промышленности.

Принцип прогрессивности и оптимизации стандартов – соответствие показателей, норм, характеристик и требований в стандартах мировому уровню науки, техники, производства, учёт прогрессивных тенденций развития стандартизируе-

мых объектов. Принципа позволяет получать в производстве максимальный экономический эффект при минимальных затратах.

Принцип взаимоувязки стандартов – учёт всех основных элементов (факторов), влияющих на конечный объект стандартизации. При стандартизации рассматривают систему характеристик и требований к комплексу взаимосвязанных материальных и нематериальных элементов. Второстепенные элементы, незначительно влияющие на объект, не учитывают.

Принцип минимального удельного расхода материалов – минимизациия удельного расхода материалов, полуфабрикатов, стоимость которых в машиностроении составляет 40…80% от конечной себестоимости продукции. Стандартизация заготовок, изделий позволяет получить экономию материалов за счёт рациональных схем и компоновок машин, совершенства методов расчёта деталей на прочность, применения экономичных профилей, сварных конструкций, литых заготовок, пластмасс, композиционных материалов.

Методы стандартизации:

- *прогрессивная стандартизация;*
- *комплексная стандартизация;*
- *опережающая стандартизация.*

Прогрессивная стандартизация (ПС) – стандартизация, которая основана на использовании технических прогнозов, патентов, изобретений, передовых научно-технических и опытно-конструкторских разработок.

Комплексная стандартизация (КС) – стандартизация, при которой осуществляют целенаправленное и планомерное установление и применение системы взаимоувязанных требований как к объекту в целом и его элементам, так и к материальным и нематериальным факторам, влияющим на объект, с целью обеспечения оптимального решения конкретной проблемы. Сущность КС - систематизация, оптимизация и увязка всех взаимодействующих факторов (в процессе проектирования, производства, эксплуатации), обеспечивающих экономически оптимальный уровень качества продукции в требуемые сроки.

Опережающая стандартизация (ОС) – установление повышенных по отношению к достигнутому на практике уровню норм, требований к объектам стандартизации, которые, согласно техническим прогнозам, будут оптимальными в последующее планируемое время. ОС относят к изделию, показателям его качества, средствам производства, методам испытания, контроля. ОС – основа проектирования новой, более совершенной техники.

В качестве примера комплексной стандартизации можно привести *Межотраслевую систему общетехнических стандартов*, направленную на решение крупных народно-хозяйственных задач, обеспечение эффективности производства высококачественной продукции.

В числе прочих в межотраслевую систему входят:

- *ЕСКД* – единая система конструкторской документации;
- *ЕСТД* – единая система технологической документации;
- *СПКП* – система показателей качества продукции;
- *УСД* – унифицированные системы документации;
- *СИБИД* - система информационно-библиографической документации;

- *ГСИ* – государственная система обеспечения единства измерений;

- *ЕСЗКС* – единая система защиты от коррозии и старения материалов и изделий;

- *стандарты на товары, поставляемые на экспорт;*

- *ССБТ* – система стандартов безопасности труда;

- *ЕСТПП* – единая система технологической подготовки производства;

- *разработка и постановка продукции на производство;*

- *система стандартов в области охраны природы и улучшения использования природных ресурсов;*

- *ЕСПД* – единая система программной документации;

- *ЕСГУКП* – единая система государственного управления качеством продукции;

- *СПДС* – система проектной документации для строительства;

- *ЕССП* – единая система стандартов приборостроения.

ЕСКД – система, устанавливающая для всех организаций и предприятий единый порядок организации проектирования, единые правила выполнения и оформления чертежей и ведения чертёжного хозяйства. Этим стандартам присвоен класс 2, например ГОСТ 2.001-93.

Основные задачи ЕСКД:

- повышение производительности труда конструкторов;

- улучшение качества чертёжной документации;

- облегчение взаимообмена конструкторской документацией между организациями;

- углубление унификации при разработке проектов изделий;

- упрощение форм конструкторских документов, графических изображений, внесения в них изменений;

- механизация и автоматизация обработки технических документов;

-эффективное хранение, учёт документов, сокращение их объёмов;

- ускорение оборота документов.

Главные перспективные направления развития ЕСКД:

- полное документальное обеспечение систем автоматизации проектно- конструкторских работ;

- документальное обеспечение автоматизированных систем управления на государственном, отраслевом уровнях и на предприятиях;

- создание общегосударственной сети вычислительных центров на базе ЭВМ четвёртого (сверхминиатюрные ЭВМ на больших интегральных схемах) и пятого (на основе световых и оптических явлений) поколений.

Система ЕСКД широко использована в современных условиях при:

- разработке автоматических систем управления производством;

- создании и применении машинных носителей информации в качестве юридически предусмотренных форм представления документации;

- применении действующих классификаторов и систем документации;

- внедрении стандартных программ сбора, хранения, передачи и обработки информации в общегосударственной автоматизированной системе.

ЕСТД – система, устанавливающая для всех организаций и предприятий единые взаимосвязанные правила, нормы и положения выполнения, оформления, комплектации и обращения, унификации и стандартизации технологической документации. Этим стандартам присвоен класс 3, например ГОСТ 3.1103-84.

ЕСТД решает информационные и организационные задачи:

- широкого внедрения типовых технологических процессов, основанных на технологическом классификаторе деталей машиностроения и приборов;
- сокращения объёма, упорядочения номенклатуры, установления правил составления технологической документации;
- разработки систем нормативов основного производства и учёта;
- повышения в конечном итоге производительности труда технологов.

ЕССП – система, призванная унифицировать и согласовывать по принципу агрегатирования параметры и характеристики приборов и устройств, входящих в систему автоматического контроля, регулирования и управления сложными технологическими процессами. Одновременно система обеспечивает функциональную, информационную, конструктивную, эксплуатационную совместимости указанных приборов и технических средств.

Совместимость технических средств – обеспечение согласованной совместной работы этих средств в предусмотренном сочетании, в рекомендуемом диапазоне нормируемых параметров (энергоносители, присоединительные и габаритно-установочные размеры, эргономические требования).

Повышение требований потребителя к техническому уровню и качеству продукции, необходимость дальнейшего совершенствования качества определяют уровень и сложность работ по стандартизации, поиск совершенствование новых эффективных форм разработки стандартов на продукцию и услуги с учётом международного разделения труда, кооперирования и особенностей товарообмена в стране и за рубежом.

Система управления качеством – совокупность организационной структуры и процедур, процессов, ресурсов, ответственности работников, направленная на повышение качества продукции (работ, услуг). На основании мирового опыта по управлению качеством в РФ приняты стандарты ГОСТ Р ИСО серии 9000. В основе этих, а также вновь разрабатываемых международных стандартов, положены принципы управления качеством:

- ориентация на запросы и требования потребителя;
- повышение роли руководителя в организации управления качеством;
- вовлечение инициативы и ответственности персонала;
- разработка процесса достижения желаемого результата;
- применение системного анализа для повышения эффективности функционирования системы взаимосвязанных процессов;
- формирование потребности у персонала постоянного улучшения продукции, процессов и системы в целом;
- принятие решений на основе сбора и анализа данных и информации;
- постановка взаимовыгодных отношений с поставщиками.

Наличие сертификата системы качества является необходимым, хотя и не достаточным, условием выхода продукции на международный рынок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Промышленность Российской Федерации конца восьмидесятых годов прошлого столетия обслуживали 80…100 тыс. стандартов, в то время как необходимое и достаточное количество стандартов составляло 1…2 тыс. Избыточная стандартизация усложняла разработку новых видов продукции и современных ресурсосберегающих, малоотходных, экологически чистых технологий. Существующая в стране система стандартизации в условиях становления рыночных отношений превратилась в препятствие развития производства новых видов товаров. Закон Российской Федерации «О стандартизации» совместно с законом «О защите прав потребителей» более 10 лет являлся законодательной основой стандартизации. В начале двадцать первого века в стране назрела необходимость совершенствования основ государственной стандартизации.

Федеральный закон «О техническом регулировании» признал утратившим силу закон о «Стандартизации» и предоставил новые возможности по дальнейшему совершенствованию стандартизации и оценки соответствия товаров и услуг обязательным требованиям стандартов. Закон «О техническом регулировании» определил приоритетные цели стандартизации – повышение уровня безопасности граждан и имущества, экологической безопасности, безопасности животных, растений, а также обеспечение научно-технического прогресса и повышение конкурентоспособности продукции, работ, услуг.

Дальнейшее развитие стандартизации, широкое применение прогрессивной, комплексной и опережающей стандартизации являются необходимыми и определяющими условиями роста национального валового продукта, роста благосостояния граждан, успешной интеграции экономики России в мировую экономическую систему, расширения международного экономического и научно-технического сотрудничества, роста объёма и совершенствования структуры международного товарообмена в интересах населения и государства.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Правовые основы стандартизации
2. Цели стандартизации.
3. Задачи стандартизации.
4. Принципы стандартизации.
5. Документы в области стандартизации.
6. Национальный орган РФ по стандартизации. Функции, права.
7. Государственный контроль (надзор) за соблюдением требований технических регламентов.
8. Национальная система стандартизации.
9. Порядок разработки и утверждения национальных стандартов.
10. Категории стандартов.
11. Объекты стандартизации.
12. Виды стандартов.
13. Международные, региональные организации по стандартизации.
14. Информационное обеспечение стандартизации.
15. Общероссийские классификаторы технико-экономической информации.
16. Работы, выполняемые при стандартизации.
17. Принципы организации работ по стандартизации.
18. Методы стандартизации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.

1. Сергеев А.Г., Латышев М.В., Терегеря В.В. Метрология, стандартизация, сертификация: Учебное пособие. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Логос, 2010. – 560 с.: ил.

2. Лифиц И.М. Стандартизация, метрология и сертификация: Учебник. – 4-е изд., перераб. и доп. - М.: Юрайт-Издат, 2009. – 335 с.

3. Димов Ю.В. Метрология, стандартизация и сертификация. Учебник для вузов. 3-е изд. – СПб.: Питер, 2010. - 464 с.: ил.

4. Яблонский О.П., Иванова В.А. Основы стандартизации, метрологии, сертификации: Учебник. – Ростов на/Д: Феникс, 2010. – 448 с.

5. Радкевич Я.М., Лактионов Б.И., Схиртладзе А.Г Метрология, стандартизация и сертификация: Учеб. для вузов - 2-е изд., доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 791 с.

6. Крылова Г.Д. Основы стандартизации, сертификации, метрологии: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2001. – 711 с.

7. Федеральный закон от 27 декабря 2002 г. N 184-ФЗ «О техническом регулировании».

8. Закон Российской Федерации от 7 февраля 1992 г. N 2300-I «О защите прав потребителей».

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица 1 - Перечень систем межгосударственных и государственных стандартов

Наименование систем	Аббревиатура в обозначении стандарта	Шифр в обозначении	Категория стандартов
1	2	3	4
Государственная система стандартизации РФ	ГСС	1.	ГОСТ Р
Единая система конструкторской документации	ЕСКД	2.	ГОСТ
Единая система технологической документации	ЕСТД	3.	ГОСТ
Система показателей качества продукции	СПКП	4.	ГОСТ
Унифицированная система документации	УСД	6.	ГОСТ ГОСТ Р
Система информационно-библиографической документации	СИБИД	7.	ГОСТ
Государственная система обеспечения единства измерений	ГСИ	8.	ГОСТ ГОСТ Р
Единая система защиты от коррозии и старения	ЕСЗКС	9.	ГОСТ
Система стандартов безопасности труда	ССБТ	12.	ГОСТ ГОСТ Р
Репрография	-	13.	ГОСТ ГОСТ Р
Единая система технологической подготовки производства	ЕСТПП	14.	ГОСТ
Система разработки и постановки продукции на производство	СРПП	15.	ГОСТ ГОСТ Р
Система стандартов в области охраны природы и улучшения использования природных ресурсов	-	17.	ГОСТ ГОСТ Р
Единая система программных документов	ЕСПД	19.	ГОСТ
Система проектной документации по строительству	СПДС	21.	ГОСТ Р
Безопасность в чрезвычайных ситуациях	-	22.	ГОСТ Р
Расчеты и испытания на прочность	-	25.	ГОСТ
Надежность в технике	-	27.	ГОСТ
Система стандартов эргономических требований и эргономического обеспечения	-	29.	ГОСТ
Информационная технология	-	34.	ГОСТ Р
Система сертификации ГОСТ Р	-	40.	ГОСТ Р
Система аккредитации в РФ	-	51.	ГОСТ Р

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Таблица Б.1 - Нормативные документы по стандартизации

Наименование документа	**Определение**	**Обозначение**	**Сфера действия**
1	2	3	4
Национальный стандарт РФ	Стандарт, принятый ФА Ростехрегулирования	ГОСТ Р	Российская Федерация
Региональный стандарт	Стандарт, принятый региональной организацией по стандартизации	ГОСТ, СТ СЭВ	Страны — члены региона
Межгосударственный стандарт (является стандартом регионального типа)	Стандарт, принятый Межгосударственным Советом по стандартизации, метрологии и сертификации или Межгосударственной научно-технической комиссией по стандартизации, техническому нормированию и сертификации в строительстве	ГОСТ	Страны — члены Межгосударственного совета (МГС) и (или) Межгосударственной научно-технической комиссии (МНТКС)
Международный стандарт	Стандарт, принятый международной организацией по стандартизации	ИСО, МЭК, ИСО/МЭК	Страны — члены и члены-корреспонденты ИСО и МЭК
Общероссийский классификатор технико-экономической информации	Документ, принятый Госстандартом России или Госстроем России	ОК	Российская Федерация
Стандарт отрасли	Стандарт, принятый государственным органом управления в пределах его компетенции применительно к продукции, работам и услугам отраслевого значения	ОСТ	В одной или нескольких отраслях
Стандарт предприятия	Стандарт, принятый предприятием применительно к внутренним продукции, работам и услугам.	СТП	На данном предприятии
Стандарт научно-технического, инженерного общества	Стандарт, принятый научно-техническим, инженерным обществом или другим общественным объединением	СТО	На принципиально новые виды продукции, процессы, услуги, методы испытаний
Правила	Документ в области стандартизации, метрологии, сертификации, аккредитации, устанавливающий обязательные для применения организационно- технические и (или) общетехнические положения, порядки (правила процедуры), методы (способы, приемы) выполнения работ соответствующих направлений, а также обязательные требования к оформлению результатов этих работ	ПР	Российская Федерация

Продолжение таблицы Б.2 Нормативные документы по стандартизации

1	2	3	4
Технические условия	Документ, разработанный на конкретную продукцию (изделие, материал, вещество)	ТУ	На конкретное изделие, материал, вещество
Рекомендации	Документ в области стандартизации, метрологии, сертификации, аккредитации, содержащий добровольные для применения организационно-технические и (или) общетехнические положения, порядки (правила процедуры), методы (способы, приемы) выполнения работ соответствующих направлений, а также рекомендуемые правила оформления результатов этих работ	Р	Российская Федерация
Правила по межгосударственной стандартизации	См. «Правила»	ПМГ	Страны — члены МГС и (или) МНКТС
Рекомендации по межгосударственной стандартизации	См. «Рекомендации»	РМГ	Страны — члены МГС и (или) МНКТС
Регламент	Документ, содержащий обязательные правовые нормы и принятый органами власти		Сфера действия регламента

Все действующие в Российской Федерации государственные, межгосударственные, региональные, национальные стандарты других стран вносятся в ежегодно переиздаваемый указатель «Национальные стандарты».

Национальные стандарты (ГОСТ Р) разрабатываются на продукцию, работы и услуги, имеющие межотраслевое значение, и не должны противоречить законодательству Российской Федерации.

Национальные стандарты должны содержать:

- требования к продукции, работам и услугам по их безопасности для окружающей среды, жизни, здоровья и имущества, требования техники безопасности и производственной санитарии;
- требования по технической и информационной совместимости, а также взаимозаменяемости продукции;
- основные потребительские (эксплуатационные) характеристики продукции, методы их контроля, требования к упаковке, маркировке, транспортированию, хранению, применению и утилизации продукции;
- правила и нормы, обеспечивающие техническое и информационное единство при разработке, производстве, использовании (эксплуатации) продукции, выполнении работ и оказании услуг, в том числе правила оформления технической документации, допуски и посадки, общие правила обеспечения качества продукции, работ и услуг, сохранения и рационального использования всех видов ресурсов, термины и их определения, условные обозначения, метрологические и другие общетехнические и организационно-технические правила и нормы. В государственных стандартах содержатся как обязательные для выполнения требования к объекту стандартизации, так и рекомендательные.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Таблица В.1 ОБЩЕРОССИЙСКИЕ КЛАССИФИКАТОРЫ

Код	Наименование ОК	Аббревиатура ОК	Год принятия ОК	Дата введения ОК
001	Общероссийский классификатор стандартов	ОКС	1993	01.01.95
002	Общероссийский классификатор услуг населению	ОКУН	1993	01.01.94
003	Общероссийский классификатор органов государственной власти и управления	ОКОГУ	1993	01.01.96
004	Общероссийский классификатор видов экономической деятельности, продукции и услуг	ОКДП	1993	01.01.94
005	Общероссийский классификатор продукции	ОКП	1993	01.07.94
006	Общероссийский классификатор информации по социальной защите населения	ОКИСЗН	1993	01.01.94
007	Общероссийский классификатор предприятий и организаций	ОКПО	1993	01.07.94
009	Общероссийский классификатор специальностей по образованию	ОКСО	1993	01.07.94
010	Общероссийский классификатор занятий	ОКЗ	1993	01.01.95
011	Общероссийский классификатор управленческой документации	ОКУД	1993	01.07.94
012	Общероссийский классификатор изделий и конструкторских документов	Классификатор ЕСКД	1993	01.07.94
013	Общероссийский классификатор основных фондов	ОКОФ	1994	01.01.96
014	Общероссийский классификатор валют	ОКВ	1994	01.07.95
015	Общероссийский классификатор единиц измерения	ОКЕИ	1994	01.01.96

016	Общероссийский классификатор профессий рабочих, должностей служащих и тарифных разрядов	ОКПДТР	1994	01.01.96
017	Общероссийский классификатор специальностей высшей научной квалификации	ОКСВНК	1994	01.07.95
018	Общероссийский классификатор информации о населении	ОКИН	1995	01.07.96
019	Общероссийский классификатор объектов административно-территориального деления	ОКАТО	1995	01.01.97
020	Общероссийский классификатор деталей, изготавливаемых сваркой, пайкой, склеиванием и термической резкой	ОКД	1995	01.07.96
021	Технологический классификатор деталей машиностроения и приборостроения	ТКД	1995	01.01.96
022	Общероссийский технологический классификатор сборочных единиц машиностроения и приборостроения	ОТКСЕ	1995	01.01.97
023	Общероссийский классификатор начального профессионального образования	ОКНПО	1995	01.07.96
024	Общероссийский классификатор экономических регионов	ОКЭР	1995	01.01.97
025	Общероссийский классификатор стран мира	ОКСМ	1995	01.07.96
026	Общероссийский классификатор информации об общероссийских классификаторах	ОКОК	1995	01.07.96
027	Общероссийский классификатор форм собственности	ОКФС	1999	01.01.2000
028	Общероссийский классификатор организационно-правовых форм	ОКОПФ	1999	01.01.2000
029	Общероссийский классификатор видов экономической деятельности	ОКВЭД	2001	01.01.2003

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебно-методическому комплексу
_____ С.А. Упоров

МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

МЕТРОЛОГИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ (КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ)

ЧАСТЬ 3

«ПОДТВЕРЖДЕНИЕ СООТВЕТСТВИЯ»

Специальность
21.05.03 Технология геологической разведки

Автор: Глушкова Т.А., к.т.н.

Одобрен на заседании кафедры
Геофизики
(название кафедры)
Зав.кафедрой _____
(подпись)
Талалай А. Г.
(Фамилия И.О.)
Протокол № 1 от 05.10. 2020
(Дата)

Рассмотрен методической комиссией факультета
_____
(название факультета)
Председатель _____
(подпись)
Бондарев В. И.
(Фамилия И.О.)
Протокол № 2 от 13.10. 2020
(Дата)

Екатеринбург
2020

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ……..2
1. Основные понятия……3
2. Цели, принципы и формы подтверждения соответствия……..3
3. Добровольное подтверждение соответствия……..4
4. Обязательное подтверждение соответствия……...5
5. Участники системы сертификации.....…….……9
6. Схемы сертификации продукции и услуг……10
7. Порядок обязательного подтверждения соответствия……13
8. Организация деятельности органов по сертификации……14
ЗАКЛЮЧЕНИЕ…...…….……16
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ……...17
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК…...……...17
ПРИЛОЖЕНИЕ А……...……...17
ПРИЛОЖЕНИЕ Б…….…..18

ВВЕДЕНИЕ

Деятельность по установлению требований к качеству продукции, услуг, процессам их производства и реализации основана на системах стандартизации, оценки соответствия.

В условиях государственного управления экономикой в процессе управления качеством участвовали с одной стороны - государство в лице предприятий, выпускающих продукцию и оказывающих услуги, совместно с контролирующими и регулирующими органами, а с другой – потребители.

В составе органов, контролирующих деятельность предприятий по качеству продукции, входили отделы технического контроля предприятий, ведомственные комиссии, органы вневедомственного контроля. Главная задача контролирующих органов – предотвращение выпуска предприятиями продукции или услуг, не соответствующих требованиям стандартов и технических условий, утверждённым образцам, положениям проектно - конструкторской и технологической документации, условиям поставки и договоров.

В девяностых годах прошлого века в ходе становления в России экономики рыночного типа получили развитие существенные процессы:

- появление производителей продукции и услуг негосударственных форм собственности;
- увеличение номенклатуры и объёма товаров и услуг;
- расширение внутреннего и международного товарообмена;
- усиление внутренней и международной конкуренции производителей товаров и услуг;
- возникновение реальных перспектив вступления России в международные экономические и торговые организации – Европейский Союз, ВТО.

Названные процессы в сочетании с мировым техническим прогрессом привели к необходимости изменения системы оценки и управления качеством продукции и услуг. В этих условиях эффективным способом гарантии качества, широко применяемым в мировой практике, явилось подтверждение соответствия требованиям стандартов третьей стороной, независимой от изготовителя (продавца) и потребителя (покупателя), - сертификация.

Становление рыночной экономики было поддержано законодательно основополагающими Федеральными законами Российской Федерации:

- «О защите прав потребителей» от 07.02.92;
- «О стандартизации» от 10.06.93;
- «О сертификации продукции и услуг» от 10.06.93.

Дальнейшее развитие экономики России потребовало совершенствования процессов стандартизации и оценки соответствия. Достижению этой цели призван способствовать федеральный закон «О техническом регулировании» от 27.12.02.

Подтверждение соответствия – документальное удостоверение соответствия продукции, процесса, работы, услуги предъявляемым к ним требованиям. Одной из форм оценки соответствия является общепризнанный в мировой практике способ - *сертификация соответствия*.

Сертификация (лат.) – «сделано верно». Чтобы убедиться в том, что продукция «сделана верно», в процессе сертификации необходимо ответить на вопросы:

- каким требованиям продукция, процесс, работа, услуга должны соответствовать?
- как путём можно получить доказательства этого соответствия?

1 Основные понятия

Аккредитация – официальное признание компетентности физического или юридического лица выполнять работы в области оценки соответствия.

Декларирование соответствия – форма подтверждения соответствия продукции требованиям ТР.

Декларация о соответствии – документ, удостоверяющий соответствие продукции требованиям ТР.

Заявитель – физическое или юридическое лицо, осуществляющее обязательное подтверждение соответствия.

Знак обращения на рынке – обозначение, информирующее приобретателя о соответствии продукции требованиям ТР.

Знак соответствия – обозначение, информирующее приобретателя о соответствии продукции требованиям системы добровольной сертификации или национальному стандарту.

Идентификация продукции – установление тождественности характеристик продукции её существенным признакам.

Орган по сертификации – юридическое лицо или индивидуальный предприниматель, аккредитованные в установленном порядке для выполнения работ по сертификации.

Оценка соответствия – прямое или косвенное определение соблюдения требований, предъявляемых к объекту.

Подтверждение соответствия – документальное удостоверение соответствия продукции, объектов, процессов требованиям ТР, положениям стандартов, условиям договоров.

Приобретатель – юридическое или физическое лицо, получающее товар или услугу для производственных, бытовых или личных целей.

Сертификация – форма осуществляемого органом по сертификации подтверждения соответствия объекта требованиям ТР, положениям стандартов или условиям договоров.

Сертификат соответствия – документ, удостоверяющий соответствие объекта требованиям ТР, положениям стандартов, условиям договоров.

Система сертификации – совокупность правил проведения сертификации, участников сертификации, правил функционирования системы.

Схема сертификации – состав, порядок и последовательность действий третьей стороны по оценке соответствия продукции, услуг, систем качества.

Форма подтверждения соответствия – определённый порядок документального удостоверения соответствия продукции или иных объектов, выполнения работ или оказания услуг требованиям ТР, положениям стандартов, условиям договоров.

2 Цели, принципы и формы подтверждения соответствия

Подтверждение соответствия осуществляют в *целях*:

- удостоверения соответствия продукции, процессов производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, работ, услуг или иных объектов требованиям ТР, стандартов и условиям договоров;
- содействия приобретателям в компетентном выборе продукции, работ, услуг;

- повышения конкурентоспособности продукции, работ, услуг на российском и международном рынках;

- создания условий для обеспечения свободного перемещения товаров по территории РФ;

- осуществления международного экономического, научно - технического сотрудничества и международной торговли.

Подтверждение соответствия осуществляют на основе *принципов*:

- доступности информации о порядке осуществления подтверждения соответствия заинтересованным лицам;

- недопустимости применения обязательного подтверждения соответствия к объектам, в отношении которых не установлены требования ТР;

- установления перечня форм и схем обязательного подтверждения соответствия в отношении определённых видов продукции в соответствующем ТР;

- уменьшения сроков осуществления обязательного подтверждения и затрат заявителя;

- недопустимости принуждения к осуществлению добровольного подтверждения соответствия, в том числе в определённой системе добровольной сертификации;

- защиты имущественных интересов заявителей;

- соблюдения коммерческой тайны в отношении сведений, полученных при осуществлении подтверждения соответствия;

- недопустимости подмены обязательного подтверждения соответствия добровольной сертификацией.

Подтверждение соответствия применяется равным образом и в равной мере независимо от:

- страны или места происхождения продукции, осуществления процессов производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, выполнения работ и оказания услуг;

- видов или особенностей сделок и лиц, которые являются изготовителями, исполнителями, продавцами, приобретателями, конечными потребителями.

Подтверждение соответствия на территории РФ имеет *характер*:

- *добровольный;*

- *обязательный.*

Добровольное подтверждение соответствия осуществляют в *форме*:

- *добровольной сертификации*.

Обязательное подтверждение соответствия осуществляют в *формах*:

- *принятия декларации о соответствии*;

- *обязательной сертификации*.

Порядок применения форм обязательного подтверждения устанавливает федеральный закон «О техническом регулировании».

3 Добровольное подтверждение соответствия.

Добровольное подтверждение соответствия осуществляется по инициативе заявителя на условиях договора между заявителем и органом по сертификации в форме добровольной сертификации. Добровольное подтверждение соответствия осуществляется для установления соответствия товара, услуги требованиям национальных стандартов, стандартов организаций, систем добровольной сертификации, условиям договоров.

Орган по добровольной сертификации:

- осуществляет подтверждение соответствия объектов добровольного подтверждения соответствия;

- оформляет и выдаёт сертификаты соответствия на объекты, прошедшие добровольную сертификацию;

- предоставляет заявителям право на применение знака соответствия, предусмотренного соответствующей системой добровольной сертификации;

- приостанавливает или прекращает действие выданных им сертификатов соответствия.

Система добровольной сертификации может быть создана юридическими лицами или индивидуальными предпринимателями. Система добровольной сертификации устанавливает:

- перечень объектов добровольной сертификации и их характеристик;

- правила выполнения работ по сертификации;

- порядок оплаты работ по сертификации;

- возможность применения знака соответствия.

Система добровольной сертификации проходит регистрацию в федеральном органе по техническому регулированию, который ведёт единый реестр зарегистрированных систем добровольной сертификации.

Системы добровольной сертификации характерны:

- активной ролью заявителя (выбирает требования к объекту, методы проверки, стандарты и другие нормативные документы, систему и схему сертификации);

- самоорганизацией системы (создание системы возможно любым субъектом хозяйственной деятельности, юридическим или физическим лицом);

- открытостью, возможностью для заинтересованных сторон ознакомиться с составом участников, правилами и процедурами сертификации;

- самостоятельностью, невмешательством федеральных и местных органов власти, общественных структур в деятельность системы.

Объекты, сертифицированные в системе добровольной сертификации, могут быть маркированы *знаком соответствия* системы. Применение знака соответствия национальному стандарту осуществляется заявителем на добровольной основе любым удобным для него способом (типографской печатью, тонкоплёночными технологиями, голографическими изображениями), месте (на товаре, упаковке, технической и сопроводительной документации, рекламе) в порядке, установленном национальным органом по стандартизации.

Знак соответствия:

- убеждает приобретателя, потребителя в надлежащем качестве и безопасности товара, услуги;

- помогает органам госнадзора принять решение о возможности реализации товара;

- является для страховых компаний гарантией безопасности товара.

В РФ действуют более ста систем добровольной сертификации, в том числе системы сертификации:

- в бизнесе и торговле;

- продукции машиностроения и приборостроения «Абрис»;

- веществ и материалов по химическому составу;

- банковских технологий;

- средств и систем в сфере информатизации;

- объектов и услуг;

- систем качества и производств Росстандарта;

- средств измерений;

- морской техники;

- интеллектуальной собственности;

- услуг связи;

- услуг информационных технологий и систем качества предприятий;

- программных средств, применяемых в обязательном медицинском страховании.

4 Обязательное подтверждение соответствия

Обязательное подтверждение соответствия проводится в случаях, установленных соответствующим ТР. Объектом обязательного подтверждения соответствия может быть только

продукция, выпускаемая в обращение на территории РФ. Форма и схемы устанавливаются ТР с учётом степени риска не достижения его целей. Декларация о соответствии и сертификат соответствия имеют равную юридическую силу на всей территории РФ независимо от схем обязательного подтверждения соответствия. Работы по обязательному подтверждению соответствия оплачивает заявитель. Стоимость работ устанавливает Правительство РФ.

Декларирование соответствия осуществляют по одному из *вариантов*:

- принятие декларации о соответствии на основании собственных доказательств;
- принятие декларации о соответствии на основании собственных доказательств и доказательств, полученных с участием органа по сертификации и (или) аккредитованной испытательной лаборатории (третьей стороны).

Заявителем может быть юридическое или физическое лицо, являющееся частным предпринимателем, изготовителем, продавцом, представителем иностранного изготовителя на основании договора с ним, круг заявителей устанавливает соответствующий ТР. Схему декларирование соответствия с участием третьей стороны ТР устанавливает, если отсутствие третьей стороны не приводит к достижению целей подтверждения соответствия.

При декларировании соответствия на основании собственных доказательств заявитель самостоятельно формирует доказательные материалы, в качестве которых использует техническую документацию, результаты собственных испытаний, исследований и (или) другие документы. Состав доказательных материалов определяет соответствующий ТР.

При декларировании соответствия на основании собственных доказательств и полученных с участием третьей стороны доказательств заявитель по своему выбору в дополнение к собственным доказательствам включает:

- протоколы исследований, испытаний и измерений, проведённых в испытательной лаборатории (центре);
- сертификат системы качества, в отношении которого предусмотрен контроль (надзор) органа по сертификации.

Декларация о соответствии оформляется на русском языке и содержит:

- наименование и указание местонахождения заявителя;
- наименование и указание местонахождения изготовителя продукции;
- информацию об объекте подтверждения соответствия;
- наименование ТР, на соответствие требованиям которого подтверждается продукция;
- указание схемы декларирования соответствия;
- заявление-декларацию изготовителя, продавца о безопасности продукции при её использовании в соответствии с целевым назначением;
- сведения о проведённых исследованиях, испытаниях и измерениях, сертификате системы качества, а также документах, послуживших основанием для подтверждения соответствия продукции требованиям ТР;
- указание срока действия декларации о соответствии;
- иные сведения, предусмотренные соответствующим ТР.

Срок действия декларации о соответствии определяет соответствующий ТР. Форму декларации утверждает федеральный орган исполнительной власти по техническому регулированию. Оформленная по установленным правилам декларация подлежит регистрации федеральным органом исполнительной власти по техническому регулированию в течение трёх дней. Порядок ведения реестра деклараций о соответствии, форму представления сведений в реестр, порядок оплаты определяет Правительство РФ.

Декларация о соответствии и доказательные документы хранятся у заявителя в течение трёх лет с момента окончания срока действия декларации. Второй экземпляр декларации хранится в федеральном органе исполнительной власти по техническому регулированию.

До вступления в силу соответствующего ТР Правительство РФ определяет и ежегодно дополняет номенклатуру (перечень) отдельных видов товаров и услуг, в отношении которых распространяется возможность принятия декларации о соответствии вместо обязательной сертификации.

В номенклатуру входят:

- продукция резинотехническая;
- приборы и аппараты оптические;
- подшипники;
- садово-огородный инвентарь;
- продукция деревообработки;
- продукция лёгкой и текстильной промышленности;
- продукция пищевой промышленности, животноводства, растениеводства;
- медицинские изделия.

Обязательное подтверждение соответствия в форме обязательной сертификации осуществляет орган по обязательной сертификации на основании договора с заявителем. Схемы сертификации устанавливает соответствующий ТР. Соответствие продукции требованиям ТР подтверждает сертификат соответствия, выданный заявителю органом по сертификации.

Сертификат соответствия оформляется на русском языке и содержит:

- наименование и указание местонахождения заявителя;
- наименование и указание местонахождения изготовителя продукции;
- наименование и указание местонахождения органа по сертификации, выдавшего сертификат соответствия;
- информацию об объекте сертификации;
- наименование ТР, на соответствие требованиям которого проводилась сертификация;
- заявление органа по обязательной сертификации о соответствии продукции, услуги предъявляемым к ней требованиям;
- информацию о проведённых исследованиях, испытаниях, измерениях;
- информацию о документах, представленных заявителем в качестве доказательств соответствия продукции требованиям ТР;
- указание срока действия сертификата соответствия.

Срок действия сертификата определяет соответствующий ТР. Форму сертификата соответствия утверждает федеральный орган исполнительной власти по техническому регулированию.

Обязательную сертификацию осуществляет орган по сертификации, аккредитованный в порядке, установленном Правительством РФ.

Орган по обязательной сертификации:

- привлекает на договорной основе для проведения исследований, испытаний и измерений испытательные лаборатории (центры), аккредитованные в порядке, установленном Правительством РФ;
- проводит анализ документов, принимает решение, оформляет и выдаёт сертификат соответствия, лицензию на применение знака обращения на рынке;
- ведёт реестр выданных им сертификатов соответствия;
- осуществляет инспекционный контроль за объектами сертификации, если контроль предусмотрен схемой обязательной сертификации, договором;
- информирует органы государственного контроля (надзора) о продукции, поступившей на сертификацию, но не прошедшей её;
- приостанавливает или прекращает действие выданного им сертификата соответствия;
- обеспечивает представление заявителям информации о порядке проведения обязательной сертификации;
- устанавливает стоимость работ по сертификации на основании утверждённой Правительством РФ методики определения стоимости работ.

Федеральный орган исполнительной власти по техническому регулированию ведёт единый реестр выданных сертификатов соответствия. Порядок ведения единого реестра, форму предоставления сведений в реестр, порядок оплаты устанавливает Правительство РФ.

Аккредитованная испытательная лаборатория (центр) оформляет результаты исследований, испытаний и измерений протоколами, на основании которых орган по сертификации при-

нимает решение о выдаче или отказе в выдаче сертификата соответствия. Аккредитованная лаборатория (центр) обязана обеспечить достоверность результатов исследований, испытаний и измерений.

Продукция, соответствие которой требованиям ТР подтверждено в установленном порядке, может быть маркирована *знаком обращения на рынке*. Изображение знака устанавливает Правительство РФ. Знак не является специально защищённым знаком и наносится заявителем в информационных целях любым удобным для него способом.

Заявитель в области обязательного подтверждения соответствия имеет право:

- выбирать форму и схему подтверждения соответствия, предусмотренные для определённых видов продукции соответствующим ТР;
- обращаться для осуществления обязательной сертификации в любой орган по сертификации, область аккредитации которого распространяется на предъявляемую к сертификации продукцию;
- обращаться в орган по аккредитации с жалобами на неправомерные действия органов по сертификации, испытательных лабораторий (центров).

Заявитель в области обязательного подтверждения соответствия обязан:

- обеспечивать соответствие продукции требованиям ТР;
- выпускать в обращение продукцию, подлежащую обязательному подтверждению соответствия, только после подтверждения соответствия;
- указывать в сопроводительной технической документации и при маркировке продукции сведения о сертификате или декларации соответствия;
- предъявлять в органы государственного контроля (надзора) за соблюдением требований ТР, а также другим заинтересованным лицам документы, свидетельствующие о подтверждении соответствия – декларацию, сертификат соответствия или их копии;
- приостанавливать или прекращать реализацию продукции, если истёк срок действия, приостановлено или прекращено действие декларации, сертификата соответствия;
- извещать орган по сертификации об изменениях, вносимых в техническую документацию или технологические процессы производства сертифицированной продукции;
- приостанавливать производство продукции, которая прошла подтверждение соответствия и не удовлетворяет требованиям ТР на основании решений органов государственного контроля (надзора).

При ввозе на территорию РФ продукции, подлежащей обязательному подтверждению соответствия, заявитель одновременно с таможенной декларацией передаёт в таможенные органы декларацию о соответствии или сертификат соответствия. Полученные за пределами территории РФ документы о подтверждении соответствия, протоколы исследований, испытаний и измерений продукции могут быть признаны в соответствии с международными договорами РФ.

В РФ действуют несколько десятков самостоятельных систем обязательного подтверждения соответствия, в том числе системы обязательной сертификации:

- авиационной техники и объектов гражданской авиации;
- посуды;
- лесопромышленной продукции;
- товаров детского ассортимента;
- электрооборудования на соответствие стандартам безопасности;
- металлорежущего, деревообрабатывающего и слесарно-монтажного инструмента;
- металлообрабатывающих станков;
- сельскохозяйственной техники;
- транспортных средств и прицепов;
- технических средств на электромагнитную совместимость;
- нефтепродуктов;
- пищевых продуктов и продовольственного сырья;
- химической продукции;
- «Электросвязь».

Документы об аккредитации, выданные органам по сертификации и аккредитованным испытательным лабораториям (центрам) до вступления в силу федерального закона «О техническом регулировании», а также документы, подтверждающие соответствие (сертификат соответствия, декларация о соответствии) считаются действительными до окончания срока, установленного в них.

Номенклатура продукции , подлежащих обязательному подтверждению соответствия и подтверждение соответствия которой осуществляется в форме принятия декларации о соответствии, определено Правительством Российской Федерации в постановлении от 1 декабря 2009 г. № 982 «Об утверждении единого перечня продукции, подлежащей обязательной сертификации, и единого перечня продукции, подтверждение соответствия которой осуществляется в форме принятия декларации о соответствии».

Пример перечня приведен в таблице 1.

Таблица 1 ИНФОРМАЦИЯ О ПРОДУКЦИИ, ПОДЛЕЖАЩЕЙ ОБЯЗАТЕЛЬНОМУ ПОДТВЕРЖДЕНИЮ СООТВЕТСТВИЯ (В ФОРМЕ ОБЯЗАТЕЛЬНОЙ СЕРТИФИКАЦИИ) В СИСТЕМЕ СЕРТИФИКАЦИИ ГОСТ Р, С УКАЗАНИЕМ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ, УСТАНАВЛИВАЮЩИХ ОБЯЗАТЕЛЬНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ [1]

Наименование объекта	**Код позиции объекта по ОК 005-93 [ОКП]**	**Обозначение определяющего нормативного документа**	**Подтверждаемые требования определяющего нормативного документа**
1	**2**	**3**	**4**
0110 Электроэнергия			
Электрическая энергия в электрических сетях общего назначения переменного трехфазного и однофазного тока частотой 50 Гц	01 1000	ГОСТ 13109-97	Пп. 5.2 (в части предельно допускаемых значений), 5.6
0251 Нефтепродукты светлые. Альтернативные виды топлива			
Этанольное моторное топливо для автомобильных двигателей с принудительным зажиганием. Бензанолы	02 5141	ГОСТ Р 52201-2004	П. 4.1
0253 Масла смазочные (нефтяные)			
Масла авиационные	02 5311	ГОСТ 21743-76	П. 2.2

5 Участники системы сертификации

Система сертификации – совокупность участников, осуществляющих сертификацию по правилам, установленным в этой системе.

В систему сертификации входят:

- национальный орган по сертификации;

[1] В данном документе учтены изменения в Постановление Правительства РФ от 01.12.2009 № 982, внесенные Постановлениями Правительства РФ от 17.03.2010 № 149, от 20.10.2010 № 848, от 13.11.2010 № 906.

- центральный орган по сертификации;
- орган по сертификации;
- испытательная лаборатория (центр);
- совет по сертификации;
- научно-методический центр по сертификации;
- комиссия по апелляциям;
- заявители сертификации.

Национальный орган по сертификации - федеральный орган исполнительной власти - Федеральное агентство РФ по техническому регулированию и метрологии, осуществляющий организацию работ по обязательной сертификации в соответствии с законодательными актами.

Центральный орган по сертификации – федеральный орган исполнительной власти, осуществляющий разработку систем, правил, порядков сертификации однородной продукции.

Орган по сертификации – региональный орган, проводящий сертификацию, созданный на базе организаций, имеющих статус юридического лица и являющийся третьей стороной. Основные функции органа:

- формирование и актуализация фонда нормативных документов;
- разработка и ведение организационно-методических документов;
- приём и рассмотрение заявок на сертификацию;
- определение испытательной лаборатории, органа по оценке системы качества, проверке производства;
- оформление и выдача сертификата установленной формы, регистрация в Государственном реестре;
- признание зарубежных сертификатов;
- организация инспекционного контроля продукции, системы качества;
- отмена или приостановление действия сертификатов по результатам инспекционного контроля;

Заявители должны иметь беспрепятственный доступ к информации об услугах органа, правилах сертификации, результатах испытаний и сертификации, исключая информацию конфиденциального характера или содержащую коммерческую тайну.

Испытательная лаборатория (центр) – организация, имеющая статус юридического лица, являющаяся третьей стороной и осуществляющая для целей сертификации испытания конкретного вида продукции или конкретные виды испытаний с оформлением протоколов.

Совет по сертификации – орган, разрабатывающий рекомендации по формированию единой политики сертификации, повышению эффективности работ, распространению информации о деятельности системы. В состав совета входят представители центрального органа по сертификации, Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии, министерств, ведомств, служб, агентств, изготовителей продукции, испытательных лабораторий, общественных организаций.

Научно-методический центр по сертификации – центр, созданный при центральном органе по сертификации и осуществляющий системные исследования, разрабатывающий методические и практические рекомендации для ведения технико-экономического анализа работ по сертификации.

Комиссия по апелляциям – комиссия, рассматривающая в установленный срок жалобы, поданные по результатам сертификации, извещает подателя и орган по сертификации о принятом решении. Комиссию создаёт центральный орган по сертификации для рассмотрения жалоб и решения спорных вопросов. В работе комиссии участвуют представители Федерального агентства РФ по техническому регулированию и метрологии, министерств, ведомств, служб, агентств, органов по сертификации, испытательных лабораторий, изготовителей сертифицируемой продукции.

Заявители сертификации – изготовители продукции, исполнители работ, продавцы, обратившиеся в орган по сертификации. Заявители обязаны:

- направлять заявку на проведение сертификации, предоставлять продукцию, необходимую нормативную, техническую и иную документацию;

- обеспечивать соответствие реализуемой продукции требованиям нормативных документов;

- маркировать продукцию знаком обращения на рынке;

- обеспечивать беспрепятственное выполнение полномочий должностными лицами органов по сертификации и инспекционному контролю;

- приостанавливать или прекращать реализацию продукции, если она не отвечает требованиям нормативных документов.

Права и обязанности заявителя регламентированы федеральным законом «О техническом регулировании».

6 Схемы сертификации продукции и услуг

Схема сертификации продукции – перечень мероприятий и последовательность действий третьей стороны по оценке соответствия различных видов продукции или услуг. Мероприятия объедены в три группы:

- испытания в испытательной лаборатории;

- проверка производства (системы качества);

- инспекционный контроль сертифицированной продукции (системы качества).

Среди мероприятий:

- испытания образца или партии продукции;

- анализ состояния производства, системы качества;

- рассмотрение декларации о соответствии;

- рассмотрение дополнительных документов, полученных заявителем помимо сертификации (протоколы приёмочных испытаний, гигиенический сертификат, ветеринарный сертификат, сертификат пожарной безопасности, сертификаты или декларации субпоставщиков, сертификаты происхождения, протоколы испытаний в зарубежных лабораториях).

Система сертификации продукции предусматривает несколько схем. Выбор схемы зависит: от вида продукции; особенностей производства, испытаний, поставки, использования продукции; требуемого уровня доказательности; возможных затрат заявителя. Схему устанавливает ТР.

Схемы сертификации продукции, применяемые в РФ, разработанные с учётом рекомендаций ИСО/МЭК и практики подтверждения соответствия ЕС, приведены в табл. 2.

Схемы 1…8 полностью соответствуют рекомендациям ИСО/МЭК. В российской практике дополнительно применяют модифицированные схемы 2а, 3а, 4а, а также схемы 9…10а, основанные на декларации изготовителя.

Современным актуальным направлением развития сертификации в российской и мировой практике является сертификация услуг (см. табл.3.1).

Объектами сертификации в сфере услуг могут быть:

- услуги, работы;

- организации, предоставляющие услуги, выполняющие работы;

- персонал, предоставляющий услуги, выполняющий работы;

- производственный процесс;

- система управления качеством.

Схемы, относящиеся к сертификации услуг и работ, включают:

- оценку мастерства исполнителя, процесса оказания услуги;

- аттестацию предприятия, сертификацию системы качества;

- проверку результатов оказания услуги;

- инспекционный контроль за сертифицированными услугами.

Таблица 2 - Схемы сертификации продукции

№ схемы	Испытания в испытательных лабораториях	Проверка производства (системы качества)	Инспекционный контроль сертифицированной продукции (системы качества)
1	Испытание типового образца продукции	--	--
1а	То же	Анализ состояния производства	--
2	То же	--	Испытания образцов продукции, взятых у продавца
2а	То же	Анализ состояния производства	То же
3	То же	--	Испытания образцов продукции, взятых у изготовителя
3а	То же	Анализ состояния производства	То же
4	То же	--	Испытания образцов продукции, взятых у продавца
4а	То же	Анализ состояния производства	Испытания образцов продукции, взятых у изготовителя
5	То же	Сертификация производства или системы качества	Контроль стабильности условий производства или функционирования системы качества
6	Рассмотрение декларации о соответствии	Сертификация системы качества	Контроль стабильности функционирования системы качества
7	Испытания партии продукции	--	--
8	Испытания каждого образца	--	--
9	Рассмотрение декларации о соответствии	--	--
9а	То же	Анализ состояния производства	--
10	То же	--	Испытания образцов, взятых у изготовителя или продавца
10а	То же	Анализ состояния производства	То же

Особенности услуг как объекта сертификации:

- субъективность проверки результата услуги (например, причёски);
- невозможность испытаний результата услуги (испытаний сложной бытовой техники после ремонта по установленным жёстким правилам испытаний);
- непосредственный контакт исполнителя и потребителя услуги требует оценки мастерства исполнителя с учётом этики общения (услуги косметического кабинета);
- предоставление услуги и её потребление происходит одновременно (парикмахерские услуги);
- некоторые характеристики услуг зависят от региона (транспортное обслуживание, общественное питание).

Схемы сертификации услуг, применяемые в РФ, приведены в табл. 3.

Таблица 3 -Схемы сертификации услуг

№ схемы	Оценка мастерства исполнителя	Оценка процесса оказания услуги	Аттестация предприятия	Сертификация системы качества	Выборочная проверка результата услуги	Инспекционный контроль
1	Оценка мастерства	--	--	--	Выборочная проверка	Проверка результатов услуги
2	--	Оценка процесса	--	--	Выборочная проверка	Контроль стабильности процесса оказания услуги
3	--	--	--	--	Выборочная проверка	Выборочная проверка результата услуги
4	--	--	Аттестация	--	Выборочная проверка	То же
5	--	--	--	Сертификация	--	Контроль стабильности функционирования системы

7 Порядок обязательного подтверждения соответствия

Порядок подтверждения соответствия на примере наиболее сложной процедуры подтверждения соответствия в форме обязательной сертификации можно представить в виде этапов:

- подача заявки на сертификацию;
- оценка соответствия продукции (услуг), системы качества, персонала;
- анализ документов;
- принятие решения;
- оформление и выдача сертификата соответствия;
- оформление и выдача лицензии на применение знака обращения на рынке;
- инспекционный контроль.
- мероприятия по результатам инспекционного контроля.

Подача заявки на сертификацию – заявитель выбирает орган по сертификации и направляет заявку установленной формы. При отсутствии органа по сертификации заявитель может обратиться в территориальный орган Федеральной службы РФ по техническому регулированию и метрологии или иной орган исполнительной власти. Орган по сертификации в течение одного месяца сообщает заявителю своё решение, в котором указаны условия сертификации – схема, наименование испытательной лаборатории, перечень нормативных документов, на соответствие которым будет проведена сертификация.

Оценка соответствия – имеет особенности в зависимости от объекта (схемы) сертификации. Для продукции – аккредитованная испытательная лаборатория осуществляет отбор и идентификацию образцов изделий, проводит испытания, оформляет и передаёт протоколы результатов испытаний заявителю и в орган по сертификации. Если схема предусматривает проверку производства, системы качества комиссия органа по сертификации проводит эти мероприятия и оформляет их актами. Для услуг (работ) орган по сертификации проводит мероприятия, соответствующие принятой схеме.

Анализ документов – протоколы испытаний, акты оценки производства, системы качества, квалификации персонала и иные документы, представленные заявителем, подвергаются анализу, для подготовки решения о соответствии продукции (услуг) требованиям ТР.

Принятие решения – на основании анализа документов, подготовленных органом по сертификации, испытательной лабораторией и представленные заявителем, эксперт составляет заключение, орган по сертификации принимает решение о соответствии продукции (услуг) требованиям ТР.

Оформление и выдача сертификата соответствия, лицензии на применение знака обращения на рынке – если решение положительное, орган по сертификации оформляет и выдаёт сертификат соответствия, лицензию на применение знака обращения на рынке, регистрирует выданные документы в Государственном реестре. Если решение отрицательное, орган по сертификации выдаёт отказ с указанием причин. Форма сертификата соответствия, срок его действия определяются правилами системы сертификации.

В сертификате соответствия продукции указаны:

- регистрационный номер, срок действия сертификата (3…5 лет);
- наименование органа по сертификации, выдавшего сертификат;
- наименование продукции, код по ОКП;
- заявление о соответствии продукции предъявляемым требованиям;
- нормативные документы, на соответствие которым выдан сертификат;
- протоколы исследований, акты проверки производства и иные документы, на основании которых выдан сертификат соответствия;
- подписи эксперта, руководителя органа по сертификации.

Инспекционный контроль – проводит орган, выдавший сертификат соответствия, если инспекционный контроль предусмотрен схемой сертификации. Контроль проходит в виде плановых (один раз в год в течение срока действия сертификата) и внеплановых (при поступлении рекламаций, при внесении существенных изменений в конструкцию изделия) проверок. В инспекционную комиссию входят представители территориального органа Федеральной службы РФ по техническому регулированию и метрологии, обществ потребителей и других заинтересованных организаций. Инспекционный контроль включает анализ информации, полученной в ходе проверок.

По результатам инспекционного контроля эксперт органа по сертификации составляет акт и принимает решение:

- о продолжении действия сертификата соответствия;
- о приостановлении или отмене действия сертификата соответствия.

Отмена действия сертификата соответствия происходит при несоответствии продукции (услуги) требованиям ТР, при изменении нормативного документа на предмет сертификации.

Мероприятия по результатам инспекционного контроля - проводит изготовитель на основании предписания об устранении нарушений требований ТР, выданном органом государственного контроля (надзора).

Обязательное подтверждение соответствия продукции в форме декларирования соответствия, добровольная сертификация проходят по упрощенной процедуре. При добровольной сертификации систему добровольной, а при её отсутствии систему обязательной сертификации, схему сертификации выбирает заявитель. При положительном решении органа по подтверждению соответствия заявитель получает документы установленной формы - декларацию соответствия, сертификат соответствия. Указанные документы имеют одинаковую юридическую силу.

8 Организация деятельности органов по сертификации

Качество сертификации товаров и услуг определяет высокая компетентность и независимость органов по сертификации, а также способность удовлетворять запросы заявителей и других заинтересованных лиц.

Деятельность органа по сертификации должна быть:

- открытой в информационном обеспечении;
- доступной в организационном и финансовом отношениях;
- антидискриминационной по признакам формы собственности и страны нахождения изготовителя (поставщика).

В административную структуру органа по сертификации входят:

- исполнительный директор;
- координационный (управляющий) совет;
- наблюдательный совет;
- комиссия по сертификации;
- комиссия по оценке системы качества;
- апелляционная комиссия;
- испытательная лаборатория.

Исполнительный директор - руководит текущей работой органа по сертификации в области аккредитации.

Координационный (управляющий) совет - обеспечивает деятельность органа по сертификации. Основные функции координационного совета:

- формирование и контроль реализации политики, определяющей деятельность органа;
- контроль стоимости работ по сертификации;
- определение в необходимых случаях состава нештатных специалистов, привлекаемых на договорных условиях для выполнения работ по сертификации;
- организация взаимодействия с национальным органом по сертификации и другими организациями, занимающимися вопросами оценки соответствия.

В координационный совет входят представители всех заинтересованных структур - министерств, служб, агентств, профессиональных ассоциаций, банков, страховых компаний, промышленных предприятий, научных и учебных организаций.

Наблюдательный совет – осуществляет общий надзор за деятельностью органа по сертификации, состоит из представителей организации учредителя.

Комиссии по сертификации и оценке системы качества - изучают отчёты экспертов, проводивших оценку соответствия, и принимают решения о выдаче или отказе в выдаче сертификата соответствия (см. прил.1).

Апелляционная комиссия - рассматривает жалобы, поступившие от заявителей на действия и решения органа по сертификации. В комиссию входят специалисты в области сертификации, независимые юристы.

Испытательная лаборатория – проводит испытания и оформляет протоколы испытаний продукции (см. прил.2), может входить в состав органа по сертификации или быть самостоятельной организацией.

Аккредитацию органов по сертификации и испытательных лабораторий (центров) осуществляют в целях:

- подтверждения компетентности органов по сертификации и испытательных лабораторий (центров), выполняющих работу по подтверждению соответствия;
- обеспечения доверия изготовителей, продавцов и приобретателей к деятельности органов по сертификации и аккредитованных испытательных лабораторий (центров);
- создания условий для признания результатов деятельности органов по сертификации и аккредитованных испытательных лабораторий (центров).

Аккредитацию органов по сертификации и испытательных лабораторий (центров), выполняющих работы по подтверждению соответствия, осуществляют на основе принципов:

- открытости и доступности правил аккредитации;
- компетентности и независимости органов, осуществляющих аккредитацию;
- недопустимости ограничения конкуренции и создания препятствий пользованию услугами органов по сертификации и аккредитованных испытательных лабораторий (центров);
- обеспечения равных условий лицам, претендующим на получение аккредитации;

- недопустимости совмещения полномочий на аккредитацию и подтверждение соответствия;

- недопустимости установления пределов действия документов об аккредитации на отдельных территориях.

Аккредитацию органов по сертификации и испытательных лабораторий (центров), выполняющих работы по подтверждению соответствия, осуществляют в порядке, установленным Правительством РФ.

Испытания продукции в целях оценки соответствия осуществляют испытательные лаборатории. Испытательная лаборатория может быть самостоятельной организацией, частью органа по сертификации или другой организации. Основные требования, предъявляемые к испытательным лабораториям (центрам):

- обладание статусом юридического лица;

- обеспечение испытаний квалифицированным персоналом, оборудованием, методиками;

- исключение возможности оказания давления на сотрудников с целью фальсификации результатов испытаний;

- предоставление результатов испытаний в виде протоколов установленной формы;

- соблюдение мер секретности конфиденциальной информации и защиты прав собственности.

Сведения о товаре (надёжности, экономичности, технических параметрах) с целью сравнения аналогичных товаров различных производителей получают по результатам *сравнительных испытаний*, проводимых в аккредитованных испытательных лабораториях. Анализ результатов публикуют в специальных изданиях.

Полученные за пределами территории РФ документы о подтверждении соответствия, знаки соответствия, протоколы исследований (испытаний) и измерений продукции могут быть признаны в соответствии с международными договорами РФ. При отсутствии такого договора товары, ввозимые на территорию РФ, проходят процедуру подтверждения соответствия на общих основаниях.

Орган по сертификации и его должностное лицо, нарушившие правила выполнения работ по сертификации, если такое нарушение повлекло за собой выпуск в обращение продукции, не соответствующей требованиям ТР, несут ответственность в соответствии с законодательством РФ.

Аккредитованная испытательная лаборатория (центр), эксперты за предоставление недостоверных или необъективных результатов исследований (испытаний) измерений несут ответственность в соответствии с законодательством РФ.

Финансирование работ в области технического регулирования осуществляют за счёт бюджетных средств, которые идут на:

- проведение государственного контроля (надзора) за соблюдением требований ТР;

- создание и ведение Федерального информационного фонда ТР и стандартов;

- реализацию программы разработки ТР, национальных стандартов, а также проведение экспертиз проектов ТР и стандартов;

- разработку общероссийских классификаторов;

- уплату взносов в международные организации по стандартизации.

Средства в федеральный бюджет поступают в виде:

- средств, полученных от заявителей за проведение работ по оценке соответствия;

- штрафов, накладываемых органами государственного контроля (надзора) на юридических и физических лиц;

- средств, вырученных от распространения стандартов, каталогов, справочников.

Расширение международного общественного движения в защиту прав человека и возрастание конкурентной борьбы на товарном рынке привели к повышению внимания к социальной лояльности.

Социальная лояльность – степень выполнения фирмой требований конвенций Международной организации труда (МОТ) и ООН в отношении использования детского труда, принудительного труда, обеспечения безопасности и гигиены работ, рабочего времени и вознаграждения, соблюдения свободы ассоциации и прав заключения коллективных договоров.

Принят международный стандарт SA 8000, который базируется на Всеобщей декларации прав человека, Конвенции ООН о правах ребёнка, рекомендациях Международной организации труда (МОТ), стандартах ИСО. Производители товаров заинтересованы в проведении независимого аудита, сертификации по требованию SA 8000 с целью получения сертификата соответствия социальной лояльности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Восстановление в начале двадцать первого века национального промышленного потенциала Российской Федерации, рост поставок по импорту, расширение списка стран партнёров в международной торговле привели к лавинообразному увеличению объёма, расширению номенклатуры товаров и услуг, подлежащих обязательной оценке соответствия. По опыту мировой практики и данным Федерального агентства Российской Федерации и по техническому регулированию и метрологии объём потенциально опасной продукции, подлежащей обязательной сертификации, достигает 80…90% от общего объёма и имеет тенденцию роста.

Практика сертификации в РФ выявила ряд существенных недостатков:

- неэффективность организационных принципов сертификации;
- завышенную номенклатуру товаров и услуг, подлежащих обязательной сертификации;
- необоснованный выбор сложных схем сертификации;
- неравномерное территориальное размещение органов по сертификации и испытательных лабораторий;
- дефицит квалифицированных кадров.

Перечисленные факторы привели к неоправданным материальным, временным, финансовым и людским затратам на организацию и осуществление процедур обязательного подтверждения соответствия.

В начале двадцать первого века в Российской Федерации назрела необходимость совершенствования и оптимизации процедур подтверждения соответствия, увеличения доли товаров и услуг, для которых обязательная сертификация может быть заменена менее затратной формой подтверждения соответствия - декларированием соответствия.

Федеральный закон «О техническом регулировании» предоставил новые возможности по дальнейшему совершенствованию оценки соответствия товаров и услуг обязательным требованиям стандартов.

Дальнейшее совершенствование процедур оценки соответствия является необходимым и определяющим условием роста национального валового продукта, успешной интеграции экономики России в мировую экономическую систему, расширения международного экономического и научно-технического сотрудничества, роста объёма и совершенствования структуры международного товарообмена в интересах нашего государства.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Цели, принципы подтверждения соответствия.
2. Характер, формы подтверждения соответствия.
3. Добровольное подтверждение соответствия.
4. Обязательное подтверждение соответствия по форме декларирования.
5. Обязательное подтверждение соответствия по форме сертификации.
6. Участники системы сертификации.
7. Схемы сертификации продукции.
8. Схемы сертификации услуг.
9. Порядок обязательного подтверждения соответствия.
10. Организация деятельности органов по сертификации.
11. Цели, принципы аккредитации органов по сертификации.
12. Финансирование работ по сертификации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.

1. Крылова Г.Д. Основы стандартизации, сертификации, метрологии: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2001. – 711 с.

2. Сертификация. Сборник нормативных документов Российской Федерации. / Под ред. д.т.н., проф. Фомина В.Н., - М.: Ассоциация авторов и издателей «Тандем». Издательство «ЭКМОС». – 2000. - 144 с.

3. Никифоров А.Д., Бакиев Т.А. Метрология, стандартизация и сертификация: Учеб. пособие. – М.: Высш. Школа, 2002. – 422 с. : ил.

4. Басаков М.И. Сертификации продукции и услуг с основами стандартизации и метрологии: Учебное пособие. Издание 2-е, испр. и доп. – Ростов на /Д: издательский центр «МарТ», 2002. – 256 с.

5. Федеральный закон «О техническом регулировании». – М.: Ось-89, 2003. – 48 с. (Актуальный закон).

6. Сергеев А.Г., Латышев М.В., Терегеря В.В. Метрология, стандартизация, сертификация: Учебное пособие. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Логос, 2004. – 560 с.: ил.

7. Лифиц И.М. Стандартизация, метрология и сертификация: Учебник. – 4-е изд., перераб. и доп. - М.: Юрайт-Издат, 2004. – 335 с.

8. Димов Ю.В. Метрология, стандартизация и сертификация. Учебник для вузов. 2-е изд. – СПб.: Питер, 2004. - 432 с.: ил.

9. Закон Российской Федерации «О защите прав потребителей». – М.: ИКЦ «МарТ», 2004. – 48 с.

10. Яблонский О.П., Иванова В.А. Основы стандартизации, метрологии, сертификации: Учебник. – Ростов на/Д: Феникс, 2004. – 448 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

ФОРМА СЕРТИФИКАТА СООТВЕТСТВИЯ НА ПРОДУКЦИЮ

ГОССТАНДАРТ РОССИИ
СИСТЕМА СЕРТИФИКАЦИИ ГОСТ Р

СЕРТИФИКАТ СООТВЕТСТВИЯ
№_____

Срок действия с _____по _____

Орган по сертификации _____
_____
_____

удостоверяет, что должным образом идентифицированная заявителем продукция_____
_____
_____

код К-ОКП

изготовитель (продавец)_____
_____
_____

код ТН ВЭД

соответствует требованиям нормативных документов_____
_____
_____

сертификат выдан на основании_____
_____
_____

дополнительная информация_____
_____
_____

Руководитель органа _____ _____
М.П. подпись инициалы, фамилия
Эксперт _____ _____
подпись инициалы, фамилия

Сертификат имеет юридическую силу на всей территории Российской Федерации

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

ФОРМА ПРОТОКОЛА ИСПЫТАНИЙ

Испытательная лаборатория _____
Регистрационный номер РОСС RU_____
Юридический адрес_____

Регистрационный номер пробы (образца)_____

ПРОТОКОЛ
испытаний проб (образцов)
от_____ 200 __ г.

ЗАЯВИТЕЛЬ_____
_____

Наименование пробы (образца)_____
Дата выработки_____
Изготовитель_____
Величина партии_____
Дата получения образца_____
Дата и место отбора проб_____
Дата проведения испытаний_____
Дополнительная информация_____
_____

Проба (образец) испытана на соответствие_____
_____

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

№ п/п	Наименование показателей	Результат испытаний	Нормируемые показатели	НД на методы испытаний
1. 2. 3.				

Испытание провели:

_____ _____
подпись (Ф. И. О.)

_____ _____
подпись (Ф. И. О.)

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебно-методическому комплексу
_____ С.А. Упоров

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

МЕТРОЛОГИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ

ТИПЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ

Специальность
21.05.03 Технология геологической разведки

Автор: Глушкова Т.А., к.т.н.

Одобрен на заседании кафедры
Геофизики
(название кафедры)
Зав.кафедрой _____
(подпись)
Талалай А. Г.
(Фамилия И.О.)
Протокол № 1 от 05.10. 2020
(Дата)

Рассмотрен методической комиссией факультета
_____
(название факультета)
Председатель _____
(подпись)
Бондарев В. И.
(Фамилия И.О.)
Протокол № 2 от 13.10. 2020
(Дата)

Екатеринбург
2020

Типы распределений

Различают дискретные и непрерывные вероятностные распределения. **Дискретное** распределение характеризуется тем, что оно сосредоточено в конечном или счетном числе точек. **Непрерывное** распределение "размазано" по некоторому вещественному интервалу.

Характеристики распределений

Вероятностное распределение может быть описано несколькими эквивалентными способами. Здесь приведены лишь некоторые из них.

- **Функция распределения**. Определена для любого вещественного распределения. Для случайной величины *X* ее функцией распределения называется
$$F_X(z) = \mathbf{P}(X \le z), \quad -\infty < z < \infty.$$
- **Плотность распределения**. Определена для непрерывных распределений. Представляет собой производную от функции распределения:
$$f_X(z) = F_X'(z), \quad -\infty < z < \infty.$$
- **Функция вероятности**. Альтернативный способ описания дискретных распределений. Если распределение случайной величины *X* сосредоточено в конечном или счетном числе точек x_1, x_2,..., x_n,... то его можно описать вероятностями принятия случайной величиной *X* соответствующих значений:

Значение	x_1	x_2	...	x_n	...
Вероятность	p_1	p_2	...	p_n	...

- Здесь $p_k = f(x_k) = P(X = x_k)$, $k=1,2,...,n,...$

Параметры распределений

Опишем некоторые параметры распределения.

- **Математическое ожидание (среднее значение) E***X* случайной величины *X*. Представляет собой интеграл вида
$$\mathbf{E}X = \int_{-\infty}^{\infty} z dF_X(z).$$
Для непрерывной случайной величины может быть выражено также через плотность ее распределения
$$\mathbf{E}X = \int_{-\infty}^{\infty} z f_X(z) dz,$$
а для дискретной случайной величины - через функцию вероятности:
$$\mathbf{E}X = \sum_k x_k p_k.$$
- **Дисперсия (рассеяние)** случайной величины *X* имеет вид
$$\mathbf{D}X = \mathbf{E}(X - \mathbf{E}X)^2.$$
В классических методах теории риска дисперсия часто использовалась в качестве меры риска, измерителя рискованности проектов.
- **Стандартное отклонение** случайной величины *X* задается выражением
$$\sigma(X) = \sqrt{\mathbf{D}X}.$$
- **Асимметрия** распределения случайной величины *X*:
$$\gamma(X) = \frac{\mathbf{E}(X - \mathbf{E}X)^3}{\sigma^3(X)},$$
характеризует различие "хвостов" распределения; асимметрия положительна при более тяжелом правом хвосте, и отрицательна при более тяжелом левом хвосте. Для симметричных распределений асимметрия равна 0.
- **Островершинность** распределения случайной величины *X*:
$$\varepsilon(X) = \frac{\mathbf{E}(X - \mathbf{E}X)^4}{\sigma^4(X)} - 3,$$
характеризует тяжесть "хвостов" распределения; положительные значения этого параметра соответствуют распределениям с более тяжелыми хвостами, чем у нормального распределения.

- **Медианой** $a = med(X)$ распределения случайной величины X называется корень уравнения

$$F_X(a) = \frac{1}{2}.$$

Медиана является средней характеристикой распределения в том смысле, что X с равными вероятностями принимает значения, лежащие справа и слева от a. Преимуществом медианы перед математическим ожиданием является тот факт, что математическое ожидание может быть неопределенным, если задающий его интеграл (в дискретном случае - ряд) расходится, как, например, в случае распределения Коши. Недостатком медианы является ее возможная неоднозначность для дискретных распределений. Медиана симметричного распределения совпадает с его средним значением (если последнее существует).

- **Модой** распределения называется наиболее вероятное значение случайной величины: в непрерывном случае - точка максимума плотности распределения, в дискретном случае - точка максимума функции вероятности. Мода распределения может быть неоднозначной, и использование этого параметра в теории риска ограничено.

Другие характеристики распределений

Вероятностное распределение может быть описано и другими характеристиками. Среди них:

- **Характеристическая функция**. Определена для произвольных распределений.

$$\varphi_X(z) = E\exp(izX) = \int_{-\infty}^{\infty} \exp(izx)dF_X(x), \quad -\infty < z < \infty.$$

Здесь i - мнимая единица. Для непрерывного распределения характеристическую функцию можно также выразить через плотность распределения:

$$\varphi_X(z) = \int_{-\infty}^{\infty} \exp(izx) f_X(x)dx, \quad -\infty < z < \infty,$$

а для дискретного распределения - через функцию вероятности

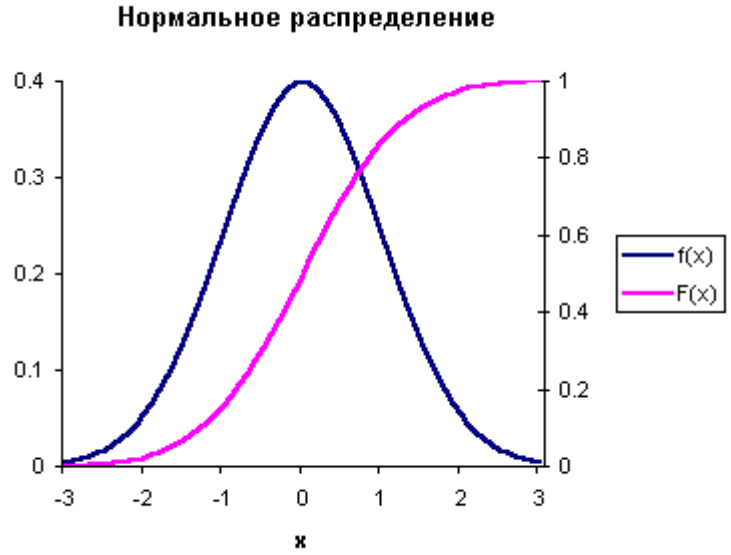
$$\varphi_X(z) = \sum_k \exp(izx_k) p_k, \quad -\infty < z < \infty.$$

Нормальное распределение

Описание

Нормальным называется вещественное непрерывное распределение с плотностью распределения $f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$, где μ и σ>0 - параметры распределения. **Стандартным** называется нормальное распределение с параметрами μ = 0 и σ = 1.

На следующем рисунке показаны графики плотности распределения (привязан к левой оси ординат) и функции распределения (привязан к правой оси ординат) с параметрами μ = 0, σ = 1.



Характеристики

В следующей таблице приведены формулы для вычисления характеристик нормального распределения.

Плотность распределения	$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$
Функция распределения*	$F(x) = \int_{-\infty}^{x} f(t)dt$
Математическое ожидание	μ
Стандартное отклонение	σ
Дисперсия	σ^2
Асимметрия	0
Островершинность	0
Медиана	μ
Мода	μ
Характеристическая функция	$\varphi(z) = \exp(iz\mu - z^2\sigma^2/2)$

* Функция нормального распределения через элементарные функции не выражается.

Моделирование

Простейший метод воспроизведения значений случайной величины с заданным нормальным распределением для использования в методах Монте Карло состоит из следующих шагов:

Получить 12 независимых значений U_1, ..., U_{12} случайной величины с равномерным распределением на отрезке [0,1].

Вычислить $N = (U_1 + ... + U_{12} - 6)$. Величина N хорошо приближает величину со стандартным нормальным распределением (с параметрами $\mu = 0$, $\sigma = 1$). Преобразованная величина $\sigma N + \mu$ дает желаемый результат.

Распределение Стьюдента

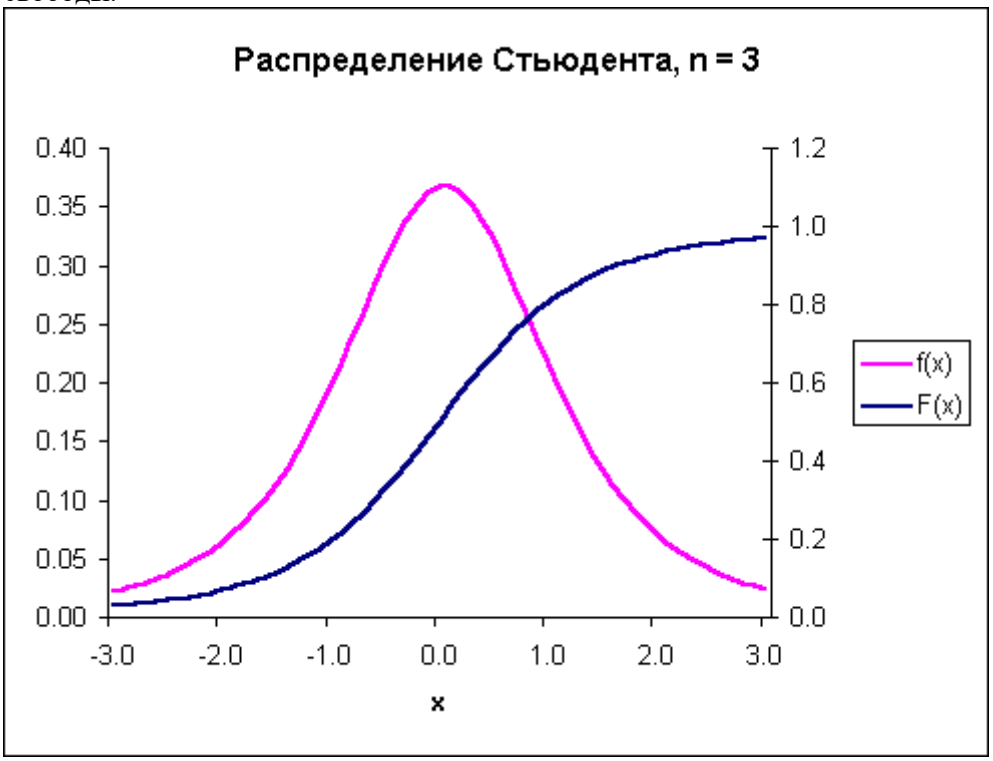
Описание

Распределением Стьюдента с n степенями свободы называется распределение случайной величины

$$t = \xi_0 / ((\xi_1^2 + ... + \xi_n^2)/n)^{1/2}, \quad (1)$$

где ξ_0, ξ_1, ... ξ_n - независимые стандартные нормальные случайные величины. Это распределение непрерывно, его плотность и значения параметров приведены ниже в таблице.

На следующем рисунке показаны графики плотности распределения (привязан к левой оси ординат) и функции распределения (привязан к правой оси ординат) Стьюдента с тремя степенями свободы.



Характеристики

В следующей таблице приведены формулы для вычисления характеристик распределения Стьюдента.

Плотность распределения	$f(x) = \frac{\Gamma((n+1)/2)}{\sqrt{\pi n}\Gamma(n/2)}\left(1+\frac{x^2}{n}\right)^{-(n+1)/2}$
Математическое ожидание	0, (n > 1)
Стандартное отклонение	$(n/(n-2))^{1/2}$, (n > 2)
Дисперсия	n/(n-2), (n > 2)
Асимметрия	0, (n > 3)
Медиана	0
Мода	0

Моделирование

Воспроизведение значений случайной величины с распределением Стьюдента с n степенями свободы производится по формуле (1).

Таблица функций распределения Стьюдента

Функции распределения Стьюдента

В следующей таблице приведены значения функции распределения Стьюдента $F_n(x)$ с n степенями

свободы для некоторых значений аргумента x в диапазоне от 0 до 20. В заголовках строк указано значение аргумента x, а в заголовках столбцов - количество степеней свободы n. Так, например, $F_5(0.9) = 0.795$.

Для отрицательных x можно вычислить значение функции по формуле $F_n(x) = 1 - F_n(-x)$. Например, $F_{10}(-1.2) = 1 - F_{10}(1.2) = 1 - 0.871 = 0.129$.

x	1	2	5	10	20	50
0	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
0.1	0.532	0.535	0.538	0.539	0.539	0.540
0.2	0.563	0.570	0.575	0.577	0.578	0.579
0.3	0.593	0.604	0.612	0.615	0.616	0.617
0.4	0.621	0.636	0.647	0.651	0.653	0.655
0.5	0.648	0.667	0.681	0.686	0.689	0.690
0.6	0.672	0.695	0.713	0.719	0.722	0.724
0.7	0.694	0.722	0.742	0.750	0.754	0.756
0.8	0.715	0.746	0.770	0.779	0.783	0.786
0.9	0.733	0.768	0.795	0.805	0.811	0.814
1	0.750	0.789	0.818	0.830	0.835	0.839
1.2	0.779	0.823	0.858	0.871	0.878	0.882
1.4	0.803	0.852	0.890	0.904	0.912	0.916
1.6	0.822	0.875	0.915	0.930	0.937	0.942
1.8	0.839	0.893	0.934	0.949	0.957	0.961
2	0.852	0.908	0.949	0.963	0.970	0.975
2.5	0.879	0.935	0.973	0.984	0.989	0.992
3	0.898	0.952	0.985	0.993	0.996	0.998
3.5	0.911	0.964	0.991	0.997	0.999	1.000
4	0.922	0.971	0.995	0.999	1.000	1.000
4.5	0.930	0.977	0.997	0.999	1.000	1.000
5	0.937	0.981	0.998	1.000	1.000	1.000
6	0.947	0.987	0.999	1.000	1.000	1.000
7	0.955	0.990	1.000	1.000	1.000	1.000
8	0.960	0.992	1.000	1.000	1.000	1.000
9	0.965	0.994	1.000	1.000	1.000	1.000
10	0.968	0.995	1.000	1.000	1.000	1.000
12	0.974	0.997	1.000	1.000	1.000	1.000
14	0.977	0.997	1.000	1.000	1.000	1.000
16	0.980	0.998	1.000	1.000	1.000	1.000
18	0.982	0.998	1.000	1.000	1.000	1.000
20	0.984	0.999	1.000	1.000	1.000	1.000

Таблица функции нормального распределения

Функция стандартного нормального распределения

В следующей таблице приведены значения функции стандартного нормального распределения Φ(.) для значений аргумента в интервале от 0 до 4 с шагом 0.01. Каждый элемент матрицы представляет значение функции Φ в точке x, равной сумме заголовков строки и столбца. Например, для нахождения значения Φ в точке 0.26, достаточно взять число из строки 0.2 и столбца 0.06, то есть, Φ(0.26) = 0.6026. Аналогично, Φ(2.31) = Φ(2.3 + 0.01) = 0.9896.

Для отрицательных x можно вычислить значение функции по формуле Φ(x) = 1 - Φ(-x). Например, Φ(-1.67) = 1 - Φ(1.67) = 1 - 0.9525 = 0.0475.

Значения функции нормального распределения $\Phi_{\mu,\sigma}$ с параметрами μ, σ вычисляются по формуле $\Phi_{\mu,\sigma}(x) = \Phi((x - \mu) / \sigma)$.

	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.5000	0.5040	0.5080	0.5120	0.5160	0.5199	0.5239	0.5279	0.5319	0.5359
0.1	0.5398	0.5438	0.5478	0.5517	0.5557	0.5596	0.5636	0.5675	0.5714	0.5753
0.2	0.5793	0.5832	0.5871	0.5910	0.5948	0.5987	0.6026	0.6064	0.6103	0.6141
0.3	0.6179	0.6217	0.6255	0.6293	0.6331	0.6368	0.6406	0.6443	0.6480	0.6517
0.4	0.6554	0.6591	0.6628	0.6664	0.6700	0.6736	0.6772	0.6808	0.6844	0.6879
0.5	0.6915	0.6950	0.6985	0.7019	0.7054	0.7088	0.7123	0.7157	0.7190	0.7224
0.6	0.7257	0.7291	0.7324	0.7357	0.7389	0.7422	0.7454	0.7486	0.7517	0.7549
0.7	0.7580	0.7611	0.7642	0.7673	0.7704	0.7734	0.7764	0.7794	0.7823	0.7852
0.8	0.7881	0.7910	0.7939	0.7967	0.7995	0.8023	0.8051	0.8078	0.8106	0.8133
0.9	0.8159	0.8186	0.8212	0.8238	0.8264	0.8289	0.8315	0.8340	0.8365	0.8389
1.0	0.8413	0.8438	0.8461	0.8485	0.8508	0.8531	0.8554	0.8577	0.8599	0.8621
1.1	0.8643	0.8665	0.8686	0.8708	0.8729	0.8749	0.8770	0.8790	0.8810	0.8830
1.2	0.8849	0.8869	0.8888	0.8907	0.8925	0.8944	0.8962	0.8980	0.8997	0.9015
1.3	0.9032	0.9049	0.9066	0.9082	0.9099	0.9115	0.9131	0.9147	0.9162	0.9177
1.4	0.9192	0.9207	0.9222	0.9236	0.9251	0.9265	0.9279	0.9292	0.9306	0.9319
1.5	0.9332	0.9345	0.9357	0.9370	0.9382	0.9394	0.9406	0.9418	0.9429	0.9441
1.6	0.9452	0.9463	0.9474	0.9484	0.9495	0.9505	0.9515	0.9525	0.9535	0.9545
1.7	0.9554	0.9564	0.9573	0.9582	0.9591	0.9599	0.9608	0.9616	0.9625	0.9633
1.8	0.9641	0.9649	0.9656	0.9664	0.9671	0.9678	0.9686	0.9693	0.9699	0.9706
1.9	0.9713	0.9719	0.9726	0.9732	0.9738	0.9744	0.9750	0.9756	0.9761	0.9767
2.0	0.9772	0.9778	0.9783	0.9788	0.9793	0.9798	0.9803	0.9808	0.9812	0.9817
2.1	0.9821	0.9826	0.9830	0.9834	0.9838	0.9842	0.9846	0.9850	0.9854	0.9857
2.2	0.9861	0.9864	0.9868	0.9871	0.9875	0.9878	0.9881	0.9884	0.9887	0.9890
2.3	0.9893	0.9896	0.9898	0.9901	0.9904	0.9906	0.9909	0.9911	0.9913	0.9916
2.4	0.9918	0.9920	0.9922	0.9925	0.9927	0.9929	0.9931	0.9932	0.9934	0.9936
2.5	0.9938	0.9940	0.9941	0.9943	0.9945	0.9946	0.9948	0.9949	0.9951	0.9952
2.6	0.9953	0.9955	0.9956	0.9957	0.9959	0.9960	0.9961	0.9962	0.9963	0.9964
2.7	0.9965	0.9966	0.9967	0.9968	0.9969	0.9970	0.9971	0.9972	0.9973	0.9974
2.8	0.9974	0.9975	0.9976	0.9977	0.9977	0.9978	0.9979	0.9979	0.9980	0.9981
2.9	0.9981	0.9982	0.9982	0.9983	0.9984	0.9984	0.9985	0.9985	0.9986	0.9986
3.0	0.9987	0.9987	0.9987	0.9988	0.9988	0.9989	0.9989	0.9989	0.9990	0.9990
3.1	0.9990	0.9991	0.9991	0.9991	0.9992	0.9992	0.9992	0.9992	0.9993	0.9993
3.2	0.9993	0.9993	0.9994	0.9994	0.9994	0.9994	0.9994	0.9995	0.9995	0.9995
3.3	0.9995	0.9995	0.9995	0.9996	0.9996	0.9996	0.9996	0.9996	0.9996	0.9997

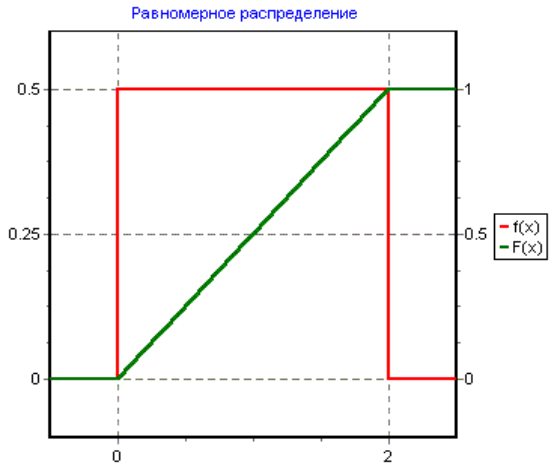
3.4	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9998
3.5	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998
3.6	0.9998	0.9998	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999
3.7	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999
3.8	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999
3.9	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
4.0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

Равномерное распределение

Описание

Говорят, что случайная величина X имеет **равномерное** распределение на отрезке [a,b], если она непрерывна, принимает значения только на отрезке [a,b], а плотность ее распределения постоянна на отрезке [a,b], и равна 0 вне этого отрезка.

На следующем рисунке показаны графики плотности (привязан к левой вертикальной оси ординат) и функции (привязан к правой оси ординат) равномерного распределения на отрезке [0,2].



Характеристики

В следующей таблице приведены формулы для вычисления характеристик равномерного распределения.

Плотность распределения	$f(x) = \begin{cases} (b-a)^{-1}, x \in [a,b] \\ 0, x \notin [a,b] \end{cases}$
Функция распределения	$F(x) = \begin{cases} 0, x < a \\ (x-a)/(b-a), x \in [a,b] \\ 1, x > b \end{cases}$
Математическое ожидание	(a + b) / 2
Стандартное отклонение	(b - a) / $2\sqrt{3}$
Дисперсия	(b - a)^2 / 12
Асимметрия	0
Островершинность	-6/5

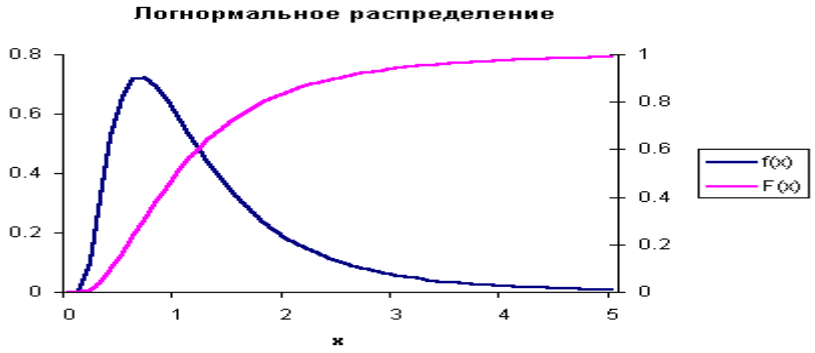
Моделирование

Моделирование значений случайной величины *U* с равномерным распределением на отрезке [0,1] доступно в большинстве современных систем программирования. Например, в языке VBA эту роль выполняет функция Rnd(), а в языках Паскаль и Дельфи - функция random.

Логнормальное распределение

Описание

Говорят, что случайная величина *X* имеет **логнормальное** распределение с параметрами μ, σ, если *X = exp(Y)*, где *Y* имеет нормальное распределение с параметрами μ, σ. Случайная величина с логнормальным распределением является непрерывной, и принимает только положительные значения. Графики плотности (привязан к левой вертикальной оси ординат) и функции (привязан к правой оси ординат) логнормального распределения с параметрами μ = 0, σ = 0.7 приведен на следующем рисунке.



Характеристики

В следующей таблице приведены формулы для вычисления характеристик логнормального распределения.

Плотность распределения	$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}x\sigma}\exp\left(-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)$
Функция распределения*	$F(x) = \int_{-\infty}^{x} f(t)dt$
Математическое ожидание	$\exp\left(\mu + \frac{1}{2}\sigma^2\right)$
Стандартное отклонение	$\exp\left(\mu + \frac{1}{2}\sigma^2\right)\sqrt{(\exp(\sigma^2)-1)}$
Дисперсия	$\exp(2\mu + \sigma^2)(\exp(\sigma^2)-1)$
Асимметрия	$(\exp(\sigma^2)+2)\sqrt{(\exp(\sigma^2)-1)}$
Мода	$\exp(\mu - \sigma^2)$

* Функция логнормального распределения F через элементарные функции не выражается. Для приближенного вычисления функции этого распределения с параметрами μ, σ можно воспользоваться формулой $F(x) = \Phi_{\mu,\sigma}(\ln x)$, где $\Phi_{\mu,\sigma}$ - функция нормального распределения с параметрами μ, σ, способ вычисления которой описан здесь.

Моделирование

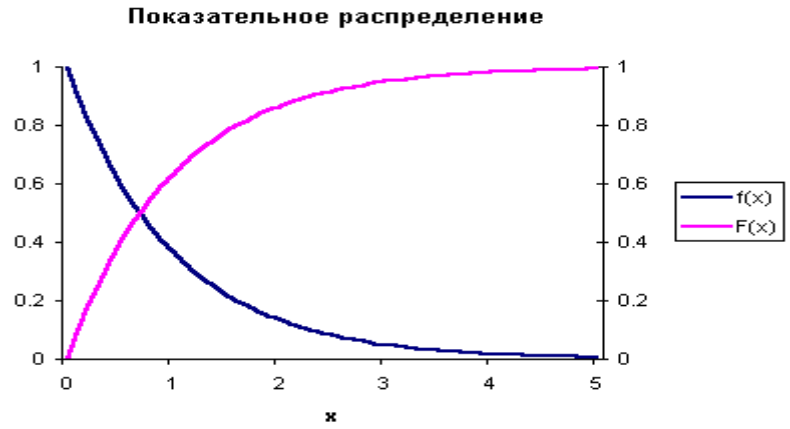
Моделирование значений случайной величины с логнормальным распределением (с параметрами μ, σ) проводится по формуле *X = exp(Y)*, где *Y* имеет нормальное распределение с теми же параметрами. Моделирование нормальных величин описано здесь.

Показательное распределение

Описание

Говорят, что случайная величина X имеет **показательное** распределение с параметром $\lambda > 0$, если она непрерывна, принимает только положительные значения, и имеет плотность распределения $f(x) = \lambda e^{-\lambda x}$ при $0 < x < \infty$.

На следующем рисунке показаны графики плотности (привязан к левой вертикальной оси ординат) и функции (привязан к правой оси ординат) показательного распределения с параметром $\lambda = 1$.



Характеристики

В следующей таблице приведены формулы для вычисления характеристик показательного распределения.

Плотность распределения	$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}$
Функция распределения	$F(x) = 1 - e^{-\lambda x}$
Математическое ожидание	$1 / \lambda$
Стандартное отклонение	$1 / \lambda$
Дисперсия	$1 / \lambda^2$
Асимметрия	2
Островершинность	6
Медиана	$\ln(2) / \lambda$
Мода	0

Моделирование

Моделирование значений случайной величины с показательным распределением (с параметром λ) проводится по формуле $-(\ln U) / \lambda$, где U имеет равномерное распределение на отрезке [0,1]. Моделирование равномерных случайных величин описано здесь.

Гамма распределение

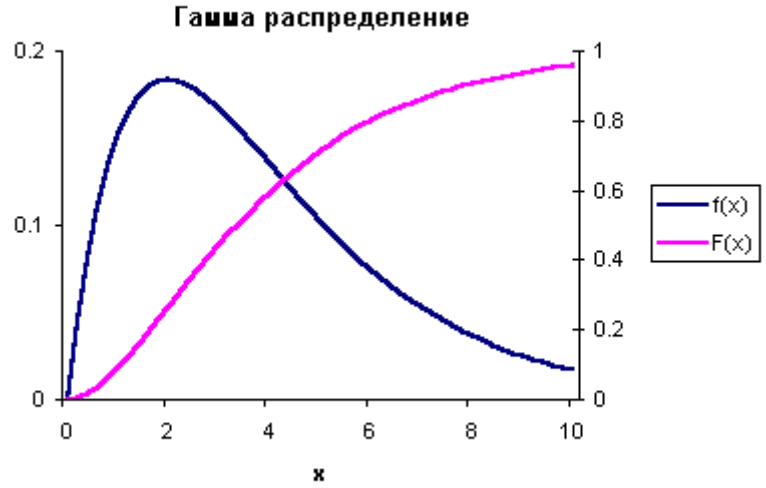
Описание

Говорят, что случайная величина *X* имеет **гамма** распределение с параметрами α > 0, β > 0, если она непрерывна, принимает только положительные значения, и имеет плотность распределения

$$f(x) = \frac{1}{\beta^{\alpha}\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}$$

.

На следующем рисунке показаны графики плотности (привязан к левой вертикальной оси ординат) и функции (привязан к правой оси ординат) гамма распределения с параметрами α = 2, β = 2.



Характеристики

В следующей таблице приведены формулы для вычисления характеристик гамма распределения.

Плотность распределения	$f(x) = \frac{1}{\beta^{\alpha}\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}$
Функция распределения*	$F(x) = \int_{-\infty}^{x} f(t)dt$
Математическое ожидание	αβ
Стандартное отклонение	$\sqrt{\alpha}\beta$
Дисперсия	$\alpha\beta^2$
Асимметрия	$2/\sqrt{\alpha}$

* Функция гамма распределения через элементарные функции не выражается.

Моделирование

Моделирование значений случайной величины с гамма распределением (с параметрами α, β) при целых значениях α > 0 проводится по формуле $\sum_{k=1}^{\alpha} P_k$, где $P_k, k = 1,\ldots,\alpha$ - независимые реализации показательных случайных величин с параметром 1/β.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебно-методическому комплексу
_____ С.А. Упоров

Методические указания к выполнению практических занятий по курсу

МЕТРОЛОГИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ

Применение методов математической статистики

Специальность
21.05.03 Технология геологической разведки

форма обучения: очная, заочная

Автор: Глушкова Т.А., к.т.н.

Одобрен на заседании кафедры
Геофизики
(название кафедры)
Зав.кафедрой _____
(подпись)
Талалай А. Г.
(Фамилия И.О.)
Протокол № 1 от 05.10. 2020
(Дата)

Рассмотрен методической комиссией факультета
_____
(название факультета)
Председатель _____
(подпись)
Бондарев В. И.
(Фамилия И.О.)
Протокол № 2 от 13.10. 2020
(Дата)

Екатеринбург
2020

При обработке *результатов физических измерений или химических анализов* большое значение имеет анализ содержащихся в них различного рода погрешностей. Для научно - исследовательских работ характерен небольшой объем измерений, из - за чего затрудняется их статистическая обработка. Знание *методов математической статистики* помогает выявлять закономерности, зависимости. Эти методы позволяют грамотно оценивать результаты своей работы, определять "степень доверия" полученным данным.

В методических указаниях приведены термины, схемы и примеры статистической обработки. Необходимые математические основы и приемы просты, не требуют от экспериментатора специальной подготовки. Для проведения анализа данных не нужно применения сложной вычислительной техники – достаточно калькулятора. Этот анализ не занимает много времени и его желательно проводить при обработке каждой серии экспериментальных данных.

1 Метрология – наука об измерениях

В практической жизни человек всюду имеет дело с измерениями. На каждом шагу встречаются измерения таких величин, как длина, объем, вес, время и др.

Измерения являются одним из важнейших путей познания природы человеком. Они дают количественную характеристику окружающего мира, раскрывая человеку действующие в природе закономерности. Все отрасли техники не могли бы существовать без развернутой системы измерений, определяющих как все технологические процессы, контроль и управление ими, так и свойства и качество выпускаемой продукций.

Отраслью науки, изучающей измерения, является *метрология*.

Метрология в ее современном понимании – наука об измерениях, методах, средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.

Единство измерений – такое состояние измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах и погрешности измерений известны с заданной вероятностью. Единство измерений необходимо для того, чтобы можно было сопоставить результаты измерений, выполненных в разных местах, в разное время, с использованием разных методов и средств измерений.

Точность измерений характеризуется близостью их результатов к истинному значению измеряемой величины.

Таким образом, важнейшей задачей метрологии является усовершенствование эталонов, разработка новых методов точных измерений, обеспечение единства и необходимой точности измерений.

Измерение является важнейшим понятием в метрологии.

Существует несколько видов измерений. При их классификации обычно исходят из характера зависимости измеряемой величины от времени, вида уравнения измерений, условий, определяющих точность результата измерений и способов выражения этих результатов.

По характеру зависимости измеряемой величины от времени измерения разделяются на

- *статические*, при которых измеряемая величина остается постоянной во времени;
- *динамические*, в процессе которых измеряемая величина изменяется и является непостоянной во времени.

Статическими измерениями являются, например, измерения размеров тела, постоянного давления, динамическими – измерения пульсирующих давлений, вибраций.

По способу получения результатов измерений их разделяют на

- прямые;
- косвенные;
- совокупные;
- совместные.

2 Термины и определения

Термины и определения в соответствии с РМГ 29-99 ГСИ Метрология. Основные термины и определения:

2.1 погрешность результата измерения:

Отклонение результата измерения от истинного (действительного) значения измеряемой величины.

Примечания

1 На практике используют действительное значение величины $x_д$, в результате чего погрешность измерения $\Delta x_{изм}$ определяют по формуле

$$\Delta x_{изм} = x_{изм} - x_д, \quad (2.1)$$

где $x_{изм}$ - измеренное значение величины.

2 Синонимом термина *погрешность измерения* является термин *ошибка измерения*, применять который не рекомендуется как менее удачный.

2.2 систематическая погрешность измерения:

Составляющая погрешности результата измерения, остающаяся постоянной или закономерно изменяющаяся при повторных измерениях одной и той же физической величины.

Примечание – В зависимости от характера измерения систематические погрешности подразделяют на *постоянные, прогрессивные, периодические* и *погрешности, изменяющиеся по сложному закону*.

Постоянные погрешности – погрешности, которые длительное время сохраняют свое значение, например, в течение времени выполнения всего ряда измерений. Они встречаются наиболее часто.

Прогрессивные погрешности – непрерывно возрастающие или убывающие погрешности. К ним относятся, например, погрешности вследствие износа измерительных наконечников, контактирующих с деталью при контроле ее прибором активного контроля.

Периодические погрешности – погрешности, значение которых является периодической функцией времени или перемещения указателя измерительного прибора.

Погрешности, изменяющиеся по сложному закону, происходят вследствие совместного действия нескольких систематических погрешностей

2.3 неисключенная систематическая погрешность;

Составляющая погрешности результата измерений, обусловленная погрешностями вычисления и введения поправок на влияние систематических погрешностей или систематической погрешностью, поправка на действие которой не введена вследствие ее малости.

Примечания

1 Иногда этот вид погрешности называют *неисключенный (ные) остаток (остатки) систематической погрешности*.

2 Неисключенная систематическая погрешность характеризуется ее границами.

Границы неисключенной систематической погрешности Θ при числе слагаемых $N \le 3$ вычисляют по формуле

$$\Theta = \pm \sum_{i=1}^{N} |\Theta i|, \quad (2.2)$$

где Θi - граница i-й составляющей неисключенной систематической погрешности.

3 При числе неисключенных систематических погрешностей $N \ge 4$ вычисления проводят по формуле

$$\Theta = \pm K \sqrt{\sum_{i=1}^{N} \Theta_i^2}, \quad (2.3)$$

где K - коэффициент зависимости отдельных неисключенных систематических погрешностей от выбранной доверительной вероятности P при их равномерном распределении (при P=0,99, K=1,4). Здесь Θ рассматривается как доверительная квазислучайная погрешность

2.4 случайная погрешность измерения:

Составляющая погрешности результата измерения, изменяющаяся случайным образом (по знаку и значению) при повторных измерениях, проведенных с одинаковой тщательностью, одной и той же физической величины

2.5 абсолютная погрешность измерения:

Погрешность измерения, выраженная в единицах измеряемой величины

2.6 относительная погрешность измерения:

Погрешность измерения, выраженная отношением абсолютной погрешности измерения к действительному или измеренному значению измеряемой величины.

Примечание – Относительную погрешность в долях или процентах находят из отношений

$$\delta = \frac{\Delta x}{x}, \text{ или } \delta = \frac{\Delta x}{x} \cdot 100\%, \qquad (2.4)$$

где Δx - абсолютная погрешность измерений;

x - действительное или измеренное значение величины

2.7 средняя квадратическая погрешность (отклонение) результатов единичных измерений в ряду измерений:

Оценка S рассеяния единичных результатов измерений в ряду равноточных измерений одной и той же физической величины около среднего их значения, вычисляемая по формуле

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \qquad (2.5)$$

где x_i - результат i-го единичного измерения;

$\bar{x}$ - среднее арифметическое значение измеряемой величины из n единичных результатов.

Примечание - –а практике широко распространен термин *среднее квадратическое отклонение* - –СКО).

2.8 средняя квадратическая погрешность результата измерений среднего арифметического;

Оценка $S_{\bar{x}}$ случайной погрешности среднего арифметического значения результата измерений одной и той же величины в данном ряду измерений, вычисляемая по формуле

$$S_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}, \qquad (2.6)$$

где S - средняя квадратическая погрешность результатов единичных измерений, полученная из ряда равноточных измерений; n - число единичных измерений в ряду

2.9 доверительные границы погрешности результата измерений:

Наибольшее и наименьшее значения погрешности измерений, ограничивающие интервал, внутри которого с заданной вероятностью находится искомое (истинное) значение погрешности результата измерений.

Примечания

1 Доверительные границы в случае нормального закона распределения вычисляются как $\pm tS$, $\pm tS_{\bar{x}}$, где S, $S_{\bar{x}}$ - средние квадратические погрешности, соответственно, единичного и среднего арифметического результатов измерений; t - коэффициент, зависящий от доверительной вероятности P и числа измерений n.

2 При симметричных границах термин может применяться в единственном числе - – *доверительная граница*.

3 Иногда вместо термина *доверительная граница* применяют термин *доверительная погрешность* или *погрешность при данной доверительной вероятности*

2.10 поправка:

Значение величины, вводимое в неисправленный результат измерения с целью исключения составляющих систематической погрешности.

Примечание - –нак поправки противоположен знаку погрешности. Поправку, прибавляемую к номинальному значению меры, называют *поправкой к значению меры*; поправку, вводимую в показание измерительного прибора, называют *поправкой к показанию прибора*

2.11 точность результата измерений:

Одна из характеристик качества измерения, отражающая близость к нулю погрешности результата измерения.

Примечание - читают, что чем меньше погрешность измерения, тем больше его точность

2.12 промах:

Погрешность результата отдельного измерения, входящего в ряд измерений, которая для данных условий резко отличается от остальных результатов этого ряда.

Примечание - иногда вместо термина "промах" применяют термин *грубая погрешность измерений*

2.13 предельная погрешность измерения в ряду измерений:

Максимальная погрешность измерения (плюс, минус), допускаемая для данной измерительной задачи.

Примечание - о многих случаях погрешность $3S$ принимают за предельную, то есть $\Delta_{пр} = \pm 3S$. При необходимости за предельную погрешность может быть принято и другое значение погрешности (где S - см. термин 9.14)

2.14 погрешность результата однократного измерения:

Погрешность одного измерения (не входящего в ряд измерений), оцениваемая на основании известных погрешностей средства и метода измерений в данных условиях (измерений).

Пример - при однократном измерении микрометром какого-либо размера детали получено значение величины, равное 12,55 мм. При этом еще до измерения известно, что погрешность микрометра в данном диапазоне составляет ±0,01 мм, и погрешность метода (непосредственной оценки) в данном случае принята равной нулю. Следовательно, погрешность полученного результата будет равна ±0,01 мм в данных условиях измерений

2.15 суммарная средняя квадратическая погрешность результата измерений:

Погрешность результата измерений (состоящая из суммы случайных и неисключенных систематических погрешностей, принимаемых за случайные), вычисляемая по формуле

$$S_{\Sigma} = \sqrt{S^2 + S_{\Theta}^2}, \qquad (2.7)$$

где $S_\Theta = \sqrt{\frac{1}{3}\sum_i \Theta_i^2}$ - средняя квадратическая погрешность суммы неисключенных систематических погрешностей при равномерном распределении (принимаемых за случайные).

Примечание - –оверительные границы суммарной погрешности $(\Delta x)_\Sigma$ могут быть вычислены по формуле

$$(\Delta x)_\Sigma = \pm t_\Sigma S_\Sigma \ , \tag{2.8}$$

где $t_\Sigma = \frac{\Theta + t \cdot S_{\bar{x}}}{S_\Theta + S_{\bar{x}}}$; Θ - граница суммы неисключенных систематических погрешностей результата измерений, вычисляемая по формулам (2.2) или (2.3); $t \cdot S_{\bar{x}}$ - доверительная граница погрешности результата измерений по 2.9

3 Нормальное распределение. Параметры нормального распределения

При хорошо отлаженной методике мы имеем дело со случайными погрешностями, величины которых больше систематических. Таким образом, проводя многократные замеры, мы получаем набор значений измеряемой величины. Какое же из этих полученных значений мы должны считать наиболее близким к истинному? За наиболее вероятное значение измеряемой величины принимают ее среднее арифметическое значение, вычисленное из всего ряда измеренных значений по формуле:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + ... + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n} \tag{3.1}$$

Положение о наибольшей вероятности среднеарифметической величины справедливо, если выполняется так называемый *нормальный закон распределения случайных погрешностей* (для большинства простых измерений он выполняется достаточно хорошо, и мы будем пользоваться нормальным распределением).

Важнейшим параметром нормального распределения случайных погрешностей является дисперсия σ^2 **,** которая является характеристикой рассеяния их относительно нуля.

$$\sigma^2(x) = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \tag{3.2}$$

Удобнее пользоваться для характеристики рассеяния значением квадратного корня из дисперсии, т.е. *среднеквадратическим отклонением погрешности*:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \tag{3.3}$$

При увеличении числа замеров величина S стремится к некоторому пределу σ, квадрат которого называется *дисперсией* и является одной из основных численных характеристик распределения.

$$\sigma = \sqrt{\frac{(x - X_1)^2 + ... + (x - X_n)^2}{n-1}} \tag{3.4}$$

Одна из задач статистической обработки выборки заключается в численном определении среднего арифметического и дисперсии. При обработке экспериментальных данных систему наблюдений над некоторой случайной величиной (результаты измерений распределяются по закону нормального распределения случайных величин) принято рассматривать как случайную выборку из некоторой гипотетической генеральной совокупности, которая представляет собой совокупность всех мыслимых наблюдений над случайной величиной при данных условиях эксперимента. Задача статистического анализа состоит в том, чтобы оценить параметры генеральной совокупности по результатам данной случайной выборки с учетом того элемента неопределенности, который вносится ограниченностью экспериментального материала. В математической статистике принято разделять выборочные параметры и параметры генеральной совокупности. Параметрам генеральной совокупности соответствуют следующие выборочные параметры (таблица 1).

Таблица 1 Соответствие параметров генеральной совокупности и выборочных параметров

Генеральная совокупность	Выборка
μ	X
σ	S_X
σ^2	S_X^2

Параметры выборки X, S_X, S_X^2 при увеличении объема выборки ($n \to \infty$) приближаются к параметрам генеральной совокупности:

$$\lim X = \mu, \lim S_X = \sigma, \lim S_X^2 = \sigma^2,$$

где μ - математическое ожидание (среднее арифметическое, генеральное среднее),

σ - генеральное среднеквадратическое отклонение (стандартное отклонение, стандарт),

σ^2 - генеральная дисперсия (теоретическая дисперсия).

Этим основным параметрам генеральной совокупности соответствуют выборочные параметры:

X - выборочное среднее (среднее выборки),

S_X - среднеквадратическая погрешность выборки,

S_X^2 - выборочная дисперсия.

Следует отметить, что объем генеральной совокупности может быть ограничен каким - то большим, но конечным числом.

Практически мы всегда имеем дело с выборками. Выборкой может быть определенное число реальных объектов (зерен минерала, образцов пород, шлифов) или измерений, наблюдений. Количество объектов выборки обозначают *n*. Как уже упоминалось, цель статистической обработки - оценка параметров генеральной совокупности по данным выборки. Эти *n* объектов выборки подвергаются детальному изучению, по результатам которого рассчитывают характеристики (выборочные параметры); они являются приближенной оценкой истинных характеристик всей реальной совокупности объектов (всей генеральной совокупности).

4 Случайная погрешность: интервальная оценка

Вклад случайной погрешности в общую неопределенность результата измерения можно оценить с помощью методов теории вероятностей и математической статистики.

Ввиду наличия случайной погрешности одна и та же величина x при каждом последующем измерении приобретает новое, непрогнозируемое значение. Такие величины называются *случайными*. Случайными величинами являются не только отдельные результаты измерений x_i, но и средние $\bar{x}$ (а также дисперсии $s^2(x)$ и все производные от них величины). Поэтому $\bar{x}$ может служить лишь *приближенной* оценкой результата измерения. В то же время, используя величины $\bar{x}$ и $s^2(x)$, возможно оценить *диапазон* значений, в котором с заданной вероятностью P может находиться результат. Эта вероятность P называется *доверительной вероятностью*, а соответствующий ей интервал значений - *доверительным интервалом*.

Строгий расчет границ доверительного интервала случайной величины возможен лишь в предположении, что эта величина подчиняется некоторому известному *закону распределения*. Закон распределения случайной величины - одно из фундаментальных понятий теории вероятностей. Он характеризует относительную долю (частоту, вероятность появления) тех или иных значений случайной величины при ее многократном воспроизведении. Математическим выражением закона распределения случайной величины служит ее *функция распределения* (функция плотности вероятности) $p(x)$. Например, функция распределения, изображенная на рисунке 1, означает, что для соответствующей ей случайной величины x наиболее часто встречаются значения вблизи x=10, а большие и меньшие значения встречаются тем реже, чем дальше они отстоят от 10.

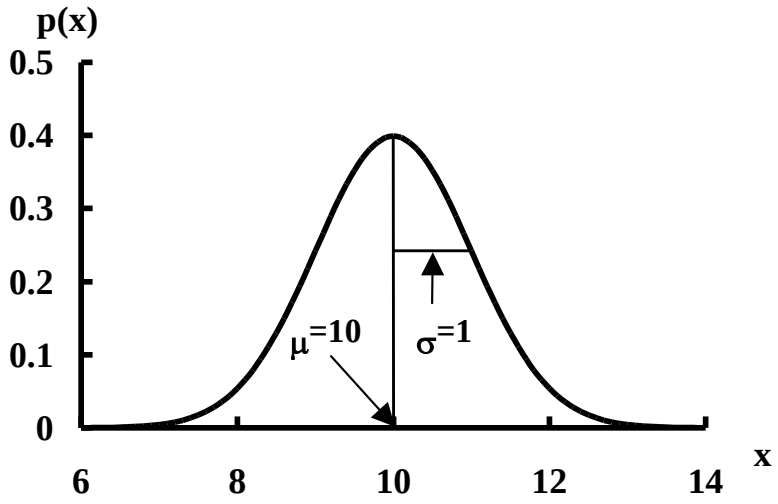


Рисунок 1 *Ф*ункция плотности вероятности $p(x)$

В качестве примера не случайно приведена колоколообразная, симметричная функция распределения. Именно такой ее вид наиболее характерен для результатов химического анализа. В большинстве случаев закон распределения результатов химического анализа можно удовлетворительно аппроксимировать так называемой *функцией нормального* (или *гауссова*) *распределения*:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \qquad (4.1)$$

Параметры этой функции μ и σ характеризуют: μ - положение максимума кривой, т.е. собственно *значение* результата анализа, а σ - ширину "колокола", т.е. *воспроизводимость* результатов. Можно показать, что среднее $\bar{x}$ является приближенным значением μ, а стандартное отклонение $s(x)$ - приближенным значением σ. Естественно, эти приближения тем точнее, чем больше объем экспериментальных данных, из которых они рассчитаны, т.е. чем больше число параллельных измерений n и, соответственно, число степеней свободы f.

В предположении подчинения случайной величины x нормальному закону распределения ее доверительный интервал рассчитывается как

$$x \pm t(P, f)s(x) \tag{4.2}$$

Ширина доверительного интервала нормально распределенной случайной величины пропорциональна величине ее стандартного отклонения. Численные значения коэффициентов пропорциональности t были впервые рассчитаны английским математиком В.Госсетом, подписывавшим свои труды псевдонимом Стьюдент, и потому называются *коэффициентами Стьюдента*. Они зависят от двух параметров: доверительной вероятности P и числа степеней свободы f, соответствующего стандартному отклонению $s(x)$.

Причина зависимости t от P очевидна: чем выше доверительная вероятность, тем шире должен быть доверительный интервал с тем, чтобы можно было гарантировать попадание в него значения величины x. Поэтому с ростом P значения t возрастают. Зависимость t от f объясняется следующим образом. Поскольку $s(x)$ - величина случайная, то в силу случайных причин ее значение может оказаться заниженным. В этом случае и доверительный интервал окажется более узким, и попадание в него значения величины x уже не может быть гарантировано с заданной доверительной вероятностью. Чтобы "подстраховаться" от подобных неприятностей, следует расширить доверительный интервал, увеличить значение t - тем больше, чем менее надежно известно значение s, т.е. чем меньше число его степеней свободы. Поэтому с уменьшением f величины t возрастают.

Коэффициенты Стьюдента для различных значений P и f приведены в табл. 1 (приложение). Проанализируйте ее и обратите внимание на отмеченные закономерности в изменении величин t в зависимости от P и f.

Если единичные значения x имеют нормальное распределение, то и среднее $\bar{x}$ тоже имеет нормальное распределение. Поэтому формулу Стьюдента для расчета доверительного интервала можно записать и для среднего:

$$\bar{x} \pm t(P, f)s(\bar{x}) \tag{4.3}$$

Величина $s(\bar{x})$ меньше, чем $s(x)$ (среднее точнее единичного). Можно показать (с. 27), что для серии из n значений $s(\bar{x}) = s(x)/\sqrt{n}$. Поэтому доверительный интервал для величины, рассчитанной из серии n параллельных измерений, можно записать как

$$\bar{x} \pm \frac{t(P, f)s(x)}{\sqrt{n}} \tag{4.4}$$

где $f=n-1$, а величины $\bar{x}$ и $s(x)$ рассчитывают по формулам (9) и (11).

Пример 1. Для серии значений объемов титранта, равных 9.22, 9.26, 9.24 и 9.27 см^3, рассчитать среднее и доверительный интервал среднего при P=0.95.

Решение. Среднее значение равно $\bar{x} = \frac{9.22 + 9.26 + 9.24 + 9.27}{4} = 9.248$ см^3.

Стандартное отклонение равно

$$s(x) = \sqrt{\frac{(9.22-9.248)^2 + (9.26-9.248)^2 + (9.24-9.248)^2 + (9.27-9.248)^2}{4-1}} = 0.0222 \text{ см}^3.$$

Табличное значение коэффициента Стьюдента $t(P=0.95, f=3)=3.18$.

Доверительный интервал составляет

$$9.248 \pm \frac{3.18 \cdot 0.0222}{\sqrt{4}} = 9.248 \pm 0.035 = 9.25 \pm 0.04 \text{ см}^3.$$

Полученный результат округляем так, чтобы полуширина доверительного интервала содержала только *одну* значащую цифру.

При расчете доверительного интервала встает вопрос о выборе доверительной вероятности *P*. При слишком малых значениях *P* выводы становятся недостаточно надежными. Слишком большие (близкие к 1) значения брать тоже нецелесообразно, так как в этом случае доверительные интервалы оказываются слишком широкими, малоинформативными. Для большинства химико-аналитических задач оптимальным значением *P* является 0.95. Именно эту величину доверительной вероятности (за исключением специально оговоренных случаев) мы и будем использовать в дальнейшем.

Подчеркнем еще раз, что величина доверительного интервала сама по себе позволяет охарактеризовать лишь *случайную* составляющую неопределенности. Оценка систематической составляющей представляет собой самостоятельную задачу.

5 Сравнение результатов анализов. Значимое и незначимое различие случайных величин

Вспомним еще раз, что любой результат измерения (в том числе среднее значение) представляет собой, вообще говоря, случайную величину. Поэтому численное различие двух результатов может быть вызвано случайными причинами и вовсе не свидетельствовать о том, что эти результаты действительно разные. Так, если результаты титрования двух аликвот равны, к примеру, 9.22 и 9.26 см^3, то из этого нельзя заключить, что они имеют разный состав, поскольку случайная погрешность измерения объемов титранта составляет несколько сотых миллилитра (см. пример 1 на с. 13).

Подобное различие случайных величин, которое (при некоторой доверительной вероятности) может быть обусловлено только случайными причинами, в математической статистике называется *незначимым*. Очевидно, что если две величины различаются незначимо, то их можно рассматривать как два приближенных значения одного и того же, общего, результата измерения. Напротив, *значимое*, т.е. превышающее уровень случайных погрешностей, различие свидетельствует о том, что соответствующие величины представляют собой два действительно разных результата. Естественно, различие можно считать значимым только тогда, когда оно достаточно велико. Граница, отделяющая значимые различия от незначимых, называется *критической величиной*. Ее можно рассчитать с помощью методов теории вероятностей.

Таким образом, задача сравнения результатов химического анализа состоит в том, чтобы выяснить, *является ли различие между ними значимым*. Сравнивать данные химического состава (и, шире, - любые экспериментальные данные) по обычным арифметическим правилам недопустимо! Вместо этого следует применять специальные приемы, называемые *статистическими тестами* или *критериями проверки статистических гипотез*. С некоторыми простейшими - и в то же время наиболее важными для химика-аналитика статистическими тестами - мы сейчас познакомимся.

6 Сравнение среднего и константы: простой тест (критерий) Стьюдента

Вернемся к задаче проверки правильности результата химического анализа путем сравнения его с независимыми данными. Проверяемый результат, являясь средним из нескольких параллельных определений, представляет собой случайную величину $\bar{x}$. Результат же, используемый для сравнения, в ряде случаев можно считать точной (действительной) величиной a, т.е. константой. Это может быть тогда, когда случайная погрешность результата, используемого для сравнения, намного меньше, чем проверяемого, т.е. пренебрежимо мала. Например, в способе "введено-найдено" заданное содержание определяемого компонента обычно известно значительно точнее, чем найденное. Аналогично, при использовании СО паспортное значение содержания также можно считать точной величиной. Наконец, и при анализе образца независимым методом содержание компонента может быть определено с точностью, намного превышающей точность проверяемой методики - например, при проверке атомно-эмиссионной методики с помощью гравиметрической (о типичных величинах случайной погрешности различных методов см. с. 9). Во всех этих случаях задача сравнения данных с математической точки зрения сводится к проверке *значимости* отличия случайной величины $\bar{x}$ от константы a.

Для решения этой задачи можно использовать уже известный нам подход, описанный выше (с. 10) и основанный на интервальной оценке неопределенности величины $\bar{x}$. Доверительный интервал для среднего, рассчитанный по формуле Стьюдента (16), характеризует неопределенность значения $\bar{x}$, обусловленную его случайной погрешностью. Поэтому если величина a входит в этот доверительный интервал, утверждать о значимом различии между $\bar{x}$ и a нет оснований. Если же величина a в этот интервал не входит, различие между $\bar{x}$ и a следует считать значимым. Таким образом, полуширина доверительного интервала, равная $\frac{t(P, f)s(x)}{\sqrt{n}}$, является критической величиной для разности $|\bar{x} - a|$: различие является значимым, если

$$|\bar{x} - a| > \frac{t(P, f)s(x)}{\sqrt{n}} \qquad (6.1)$$

Для проверки значимости различия между средним и константой вместо вычисления доверительного интервала можно поступить следующим образом. Легко видеть, что выражение (17) эквивалентно выражению

$$\frac{|\bar{x} - a|}{s(x)}\sqrt{n} > t(P, f) \qquad (6.2)$$

Величина, стоящая в левой части выражения (18), характеризует степень различия между $\bar{x}$ и a с учетом случайной погрешности $s(x)$. Она называется *тестовой статистикой* (и в общем случае обозначается в дальнейшем как ξ) для сравниваемых значений. Коэффициент Стьюдента, стоящий в правой части (18), в этом случае непосредственно является критической величиной. Поэтому для проверки значимости различия между $\bar{x}$ и a можно вычислить соответствующую тестовую статистику и сравнить ее с критическим значением - в данном случае табличным значением коэффициента Стьюдента. Если тестовая статистика превосходит критическое значение, различие между сравниваемыми величинами следует признать значимым.

Описанный способ сравнения случайных величин - вычисление тестовой статистики и сравнение ее с табличным критическим значением - является весьма общим. На таком принципе основано множество *статистических тестов* (или *критериев*) - процедур, призванных установить значимость различия между теми или иными случайными величинами. Тест, представленный формулой (18) и предназначенный для сравнения среднего значения и константы, называется *простым тестом Стьюдента*. В химическом анализе его следует применять всегда, когда возникает задача сравнения результатов анализа с каким-либо значением, которое можно считать точной величиной.

Пример 2. При определении никеля в стандартном образце сплава получена серия значений (% масс.) 12.11, 12.44, 12.32, 12.28, 12.42. Содержание никеля согласно паспорту образца - 12.38 %. Содержит ли использованная методика систематическую погрешность?

Решение. Паспортное содержание никеля считаем действительным (точным) значением и применяем простой тест Стьюдента. Имеем:

$$\bar{x} = 12.314,\ s(x)=0.132,\ n=5,\ f=4,\ a=12.38.$$

$$\xi = \frac{|\bar{x} - a|}{s(x)}\sqrt{n} = \frac{12.38 - 12.314}{0.132}\sqrt{5} = 1.12 < t(P=0.95,\ f=4)=2.78$$

Отличие результата анализа от действительного значения незначимо, методика не содержит систематической погрешности.

7 Сравнение двух средних. Критерий Стьюдента

При интерпретации результатов химического анализа возникают и более сложные задачи. Предположим, необходимо сравнить два результата анализа одного и того же образца, полученные разными методами, и при этом оба результата содержат сравнимые между собой случайные погрешности. В этом случае уже нельзя ни один из результатов считать точной величиной и, соответственно, применять простой тест Стьюдента. Математически задача сводится в этом случае к установлению значимости различия между двумя средними значениями $\bar{x}_1$ и $\bar{x}_2$.

Для решения этой задачи используют *модифицированный тест Стьюдента*. Он существует в двух вариантах: точном и приближенном. Точный вариант применяют тогда, когда дисперсии соответствующих величин $s_1^2 = s^2(x_1)$ и $s_2^2 = s^2(x_2)$ различаются незначимо (что, в свою очередь, необходимо предварительно проверить с помощью еще одного статистического теста - теста Фишера, см. следующий раздел). При значимом различии s_1^2 и s_2^2 применяют приближенный вариант (приближение Уэлча).

В точном варианте модифицированного теста Стьюдента тестовая статистика вычисляется как

$$\xi = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\bar{s}(x)}\sqrt{\frac{n_1 n_2}{n_1 + n_2}} \qquad (7.1)$$

Как видим, по способу вычисления она весьма похожа на тестовую статистику простого теста Стьюдента (см. формулу (18)). В выражении (19) n_1 и n_2 - числа параллельных значений, из которых рассчитаны величины $\bar{x}_1$ и $\bar{x}_2$, соответственно, а $\bar{s}(x)$ - *среднее стандартное отклонение*, вычисляемое как

$$\bar{s}(x) = \sqrt{\bar{s}^2(x)} = \sqrt{\frac{f_1 s_1^2 + f_2 s_2^2}{f_1 + f_2}} \tag{7.2}$$

Величины f_1 и f_2 - числа степеней свободы соответствующих дисперсий, равные n_1-1 и n_2-1. Критическим значением служит коэффициент Стьюдента $t(P,f)$ для выбранной доверительной вероятности P (обычно 0.95) и числа степеней свободы

$$f=f_1+f_2=n_1+n_2-2 \tag{7.3}$$

Таким образом, значимое различие между $\bar{x}_1$ и $\bar{x}_2$ имеет место тогда, когда

$$\frac{\left|\bar{x}_1 - \bar{x}_2\right|}{\bar{s}(x)} \sqrt{\frac{n_1 n_2}{n_1 + n_2}} > t(P, f = n_1 + n_2 - 2) \tag{7.4}$$

В приближении Уэлча тестовая статистика вычисляется следующим образом:

$$\xi = \frac{\left|\bar{x}_1 - \bar{x}_2\right|}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \tag{7.5}$$

Критическим значением вновь служит коэффициент Стьюдента $t(P,f)$. Число степеней свободы в этом случае вычисляется как

$$f = \frac{(s_1^2/n_1 + s_2^2/n_2)^2}{\frac{(s_1^2/n_1)^2}{n_1 - 1} + \frac{(s_2^2/n_2)^2}{n_2 - 1}} \tag{7.6}$$

и округляется до ближайшего целого числа. Приближенный вариант теста Стьюдента недостаточно достоверен, особенно при малых значениях f_1 и f_2.

8 Сравнение дисперсий двух серий данных. Критерий Фишера

Для выбора между точным и приближенным вариантом модифицированного теста Стьюдента необходимо предварительно установить, есть ли значимое различие между величинами s_1^2 и s_2^2, т.е. дисперсий обеих серий данных. Разумеется, задача сравнения дисперсий имеет и вполне самостоятельное значение.

Как и средние $\bar{x}$, дисперсии s^2 тоже представляют собой случайные величины. Поэтому и их сравнение тоже нужно производить с использованием соответствующих статистических тестов. Тест для сравнения двух дисперсий был предложен английским биологом Р.Фишером и носит его имя.

В тесте Фишера тестовой статистикой служит отношение большей дисперсии к меньшей:

$$\xi = \frac{s_1^2}{s_2^2} \tag{8.1}$$

Подчеркнем, что необходимо, чтобы $s_1^2 \geq s_2^2$ и, соответственно, $\xi \geq 1$, в противном случае индексы следует поменять местами. Критическим значением служит специальный *коэффициент Фишера* $F(P, f_1, f_2)$, зависящий от трех параметров - доверительной вероятности P и чисел степеней свободы f_1 и f_2 дисперсий s_1^2 и s_2^2, соответственно. Значения коэффициентов Фишера для стандартной доверительной вероятности P=0.95 приведены в табл. 2 (приложение). Обратите внимание, что $F(f_1, f_2) \neq F(f_2, f_1)$, поэтому при пользовании этой таблицей надо быть очень внимательными.

Если отношение дисперсий (25) меньше, чем соответствующее значение $F(P, f_1, f_2)$, это означает, что различие между s_1^2 и s_2^2 незначимо - дисперсия обеих серий одинакова, - или, как говорят, "дисперсии однородны". В этом случае можно вычислить *среднюю дисперсию* $\bar{s}^2$ по формуле (20) и пользоваться ею как общей характеристикой дисперсий обеих серий. Число степеней свободы этой дисперсии равно $f_1 + f_2$. Если же дисперсии неоднородны, вычисление средней дисперсии, очевидно, лишено смысла.

Еще раз обратим внимание, что тест Фишера предназначен для сравнения только дисперсий результатов, но никак не самих результатов (т.е. средних). Делать какие-либо выводы о различии средних значений, наличии в той или иной серии данных систематической погрешности, различиях в составе образцов и т.д. на основании теста Фишера недопустимо. Для сравнения средних значений после теста Фишера следует применять тест Стьюдента (в той или иной его разновидности).

Пример 3. Примесь тиофена в бензоле (% массовой доли) определяли спектрофотометрическим (1) и хроматографическим (2) методами. Получили следующие серии данных:

(1) 0.12 0.19 0.16 0.14

(2) 0.18 0.32 0.24 0.25 0.28

Известно, что хроматографическая методика не содержит систематической погрешности. Содержит ли систематическую погрешность спектрофотометрическая методика?

Решение. Вычислим средние и дисперсии для обеих серий:

(1) $\bar{x} = 0.153$, $s_1^2 = 8.91 \cdot 10^{-4}$, n_1=4, f_1=3

(2) $\bar{x} = 0.254$, $s_2^2 = 2.68 \cdot 10^{-3}$, n_2=5, f_2=4

Сравним дисперсии серий по тесту Фишера:

$\xi = s_2^2 / s_1^2 = 3.0$ (делим большую дисперсию на меньшую!)

Критическое значение $F(0.95, 4, 3) = 9.1$ (не $F(0.95, 3, 4) = 6.6$!)

$\xi < F$, дисперсии данных одинаковы. Поэтому вычисляем среднее стандартное отклонение и применяем точный вариант теста Стьюдента:

$$\bar{s}(x) = \sqrt{\frac{3 \cdot 8.91 \cdot 10^{-4} + 4 \cdot 2.68 \cdot 10^{-3}}{3+4}} = 0.0437$$

$$\xi = \frac{0.254 - 0.153}{0.0437} \sqrt{\frac{4 \cdot 5}{4+5}} = 3.27 \qquad t(P=0.95, f=7) = 2.37$$

$\xi > t$, средние различаются значимо, спектрофотометрическая методика содержит систематическую погрешность (отрицательную).

Пример 4. В образце сплава определили медь спектрографическим атомно-эмиссионным (1) и титриметрическим (2) методами. Получены следующие результаты (% массовой доли).

(1) 12.1 14.1 13.6 14.8

(2) 13.40 13.75 13.65 13.58 13.60 13.45

Известно, что титриметрическая методика не содержит систематической погрешности. Содержит ли систематическую погрешность атомно-эмиссионная методика?

Решение. Вычислим средние и дисперсии для обеих серий:

(1) $\bar{x}$ = 13.65, $s_1^2 = 1.31$, n_1=4, f_1=3

(2) $\bar{x}$ = 13.57, $s_2^2 = 1.66 \cdot 10^{-2}$, n_2=6, f_2=5

Сравним дисперсии данных по тесту Фишера:

$\xi = s_1^2 / s_2^2 = 78.8$

Критическое значение $F(0.95, 3, 5) = 5.4$. $\xi > F$, дисперсии данных различаются. Для сравнения средних значений применяем приближенный тест Стьюдента-Уэлча:

$$\xi = \frac{13.65 - 13.57}{\sqrt{\frac{1.31}{4} + \frac{1.66 \cdot 10^{-2}}{6}}} = 0.14, \qquad f = \frac{(1.31/4 + 1.66 \cdot 10^{-2}/6)^2}{\frac{(1.31/4)^2}{3} + \frac{(1.66 \cdot 10^{-2}/6)^2}{5}} = 3.05 \sim 3,$$

$t(P=0.95, f=3) = 3.18$. $\xi < t$, значимое различие между средними и систематическая погрешность атомно-эмиссионной методики отсутствуют.

Поскольку случайная погрешность титриметрических данных намного меньше, чем атомно-эмиссионных, можно значение 13.57 считать точной величиной и применить простой тест Стьюдента:

$$\xi = \frac{13.65 - 13.57}{\sqrt{1.31}} \sqrt{4} = 0.14 < t(P=0.95, f=3) = 3.18$$

И в этом случае также делаем вывод об отсутствии систематической погрешности атомно-эмиссионной методики.

9 Выявление промахов. Q-тест

В обрабатываемой серии данных должны отсутствовать промахи (с. 9). Поэтому прежде, чем проводить любую обработку данных (начиная с вычисления среднего), следует выяснить, содержит ли она промахи, и если да, то исключить их из рассмотрения. Для выявления промахов служит еще один статистический тест, называемый Q-тестом.

Алгоритм Q-теста состоит в следующем. Серию данных упорядочивают по возрастанию: $x_1 \le x_2 \le ... \le x_{n-1} \le x_n$. В качестве возможного промаха рассматривают одно из крайних значений x_1 или x_n - то, которое дальше отстоит от соседнего значения, т.е. для которого больше разность x_2-x_1 либо, соответственно, x_n-x_{n-1}. Обозначим эту разность как W_1. Размах всей серии, т.е. разность между максимальным и минимальным значением x_n-x_1, обозначим W_0. Тестовой статистикой является отношение

$$\xi = \frac{W_1}{W_0} \qquad (9.1)$$

Эта величина заключена в пределах от 0 до 1. Чем дальше отстоит "подозрительное" значение от основной массы данных, тем выше вероятность того, что это промах - и тем больше, в свою очередь, величина ξ. Критической величиной служит табличное значение Q-коэффициента $Q(P, n)$ (табл. 3, приложение), зависящее от доверительной вероятности и общего числа данных в серии. Если тестовая статистика превышает критическую величину ($\xi > Q$), соответствующее значение считают промахом и из серии данных исключают. После этого следует проверить на наличие промахов оставшиеся данные (с другим значением Q), поскольку промах в серии может быть не один.

При применении Q-теста вместо стандартной доверительной вероятности, равной 0.95, обычно используют значение P=0.90. Наиболее достоверные результаты получаются при n=5-7. Для серий большего или меньшего размера Q-тест недостаточно надежен.

Пример 5. При спектрофотометрическом анализе раствора органического красителя получены значения оптической плотности, равные 0.376, 0.398, 0.371, 0.366, 0.372 и 0.379. Содержит ли эта серия промахи? Чему равно среднее значение оптической плотности? Охарактеризуйте воспроизводимость измерения оптической плотности для данного образца.

Решение. Располагаем полученные результаты в порядке возрастания:

0.366 0.371 0.372 0.376 0.379 0.398

Разность 0.371-0.366 равна 0.005, а 0.398-0.379 равна 0.019, поэтому кандидат в промахи - значение 0.398, а W_1=0.019. Размах выборки W_0=0.398-0.366=0.032. Тестовая статистика равна ξ = 0.019/0.032 = 0.59. Критическая величина $Q(P=0.90, n=6)$ равна 0.56. Таким образом, $\xi > Q$, значение 0.398 - промах, его следует исключить.

Проверяем оставшуюся серию значений: 0.371-0.366=0.005, 0.379-0.376=0.003, поэтому следующий кандидат в промахи - 0.366. Имеем: W_1=0.005, W_0=0.379-0.366=0.013, ξ = 0.005/0.013 = 0.38, $Q(P=0.90, n=5)$=0.64. $\xi < Q$, значение 0.366 промахом не является.

Среднее значение оптической плотности составляет

$$\bar{x} = \frac{0.366 + 0.371 + 0.372 + 0.376 + 0.379}{5} = 0.373$$

а его стандартное отклонение - $s(x)$ = 0.005. Воспроизводимость охарактеризуем относительным стандартным отклонением (с. 9) $s_r(x)=s(x)/\bar{x}$ = 0.005/0.373 = 0.013.

Обработка серии данных вместе с промахом была бы в этом случае грубой ошибкой и привела бы к серьезному искажению значений $\bar{x}$ и $s(x)$.

Приложение А
(справочное)

Практическая работа 1

Среднее арифметическое. Среднеквадратическое отклонение.

Среднее арифметическое выборки - выборочное среднее - лучшая оценка генерального среднего. Поэтому при измерении какой-либо величины за результат принимается среднеарифметическое результатов отдельных замеров (после исключения систематических погрешностей). Среднее из определений (замеров) обозначается как $\overline{X}$n:

$$X_n = \frac{X_1 + X_2 + \cdots + X_n}{n}. \qquad (4.1)$$

Среднеквадратическое отклонение результатов измерения S_x - наиболее обоснованная и распространенная мера случайных погрешностей. В случае, когда имеется n единичных измерений величины X, среднеквадратическое отклонение рассчитывается по формуле:

$$S_X = \sqrt{\frac{\left(X_1 - \overline{X}_n\right)^2 + \left(X_2 - \overline{X}_n\right)^2 + \ldots + \left(X_n - \overline{X}_n\right)^2}{n-1}} \qquad (4.2)$$

или

$$S_x = \sqrt{\frac{\left(X_1^2 + X_2^2 + \ldots + X_n^2\right) - \frac{\left(X_1 + X_2 + \ldots + X_n\right)^2}{n}}{n-1}}, \qquad (4.3)$$

где *n* - объем выборки (число замеров), S_x - среднеквадратическое отклонение, X_1, X_2,.....X_n - результаты замеров, $\overline{X}$n - выборочное среднее. Последняя формула более удобна при расчетах на калькуляторах. При вычислениях по этим двум формулам возведение в квадрат должно выполняться без округления результатов (причем точность резко уменьшается при малых n). Величина S_x называется среднеквадратичной погрешностью результатов отдельного измерения. Она имеет ту же размерность, что и переменная *X*. Относительная точность расчета S_x от 50 до 100 относительных %, поэтому для S_x записываются 1 - 2 значащие цифры.

Величина среднеквадратического отклонения выборки S при больших n (~ 100) может быть довольно близка к среднеквадратическому отклонению генеральной совокупности σ. При малых *n* значения *S* могут сильно отличаться от "истинного значения" σ. Поэтому желательно оценивать доверительные интервалы по следующей схеме.

- Рассчитывают среднеквадратическое отклонение S_x по приведенным формулам.
- Задают необходимую доверительную вероятность P. Обычно P= 0.95.

Доверительная вероятность измерений должна задаваться самим экспериментатором. Эта величина, определяющая надежность результатов. Чем более ответственны результаты, тем более высокую доверительную вероятность надо принимать. Для технических и аналитических определений (например состав фаз, параметров элементарной ячейки и

других очень точных измерений) обычно принимается доверительная вероятность 0.95. Для важных измерений (на которых базируется новый закон, новое положение или от которых зависит безопасность людей) P= 0.99.

3.По таблице А.1 для принятой P и *n* находят доверительные границы отклонения величины S_x (в долях S_x) γ γ_1 и γ_2 .

Таблица А.1 Коэффициенты γ_1 и γ_2 для оценки доверительных интервалов погрешностей расчета среднеквадратического отклонения.

	P= 0.95		P= 0.90	
n	γ_1	γ_2	γ_1	γ_2
2	0.42	32	0.51	16
3	0.52	6.3	0.58	4.4
4	0.57	3.7	0.62	2.9
5	0.60	2.9	0.65	2.4
6	0.62	2.5	0.67	2.1
7	0.64	2.2	0.69	1.9
8	0.66	2.0	0.70	1.8
9	0.68	1.9	0.72	1.7
10	0.69	1.8	0.73	1.6
12	0.71	1.7	0.75	1.5
14	0.73	1.6	0.76	1.5
16	0.74	1.5	0.77	1.4
18	0.75	1.5	0.79	1.4
20	0.76	1.5	0.79	1.4
25	0.78	1.4	0.81	1.3
30	0.80	1.3	0.83	1.3
50	0.84	1.2	0.86	1.2
100	0.88	1.2	0.90	1.1
200	0.91	1.1	0.93	1.1

4. Находят доверительные границы отклонения S_x:

$S_{мин} = S_X \gamma_1$, $S_{макс} = S_X \gamma_2$,

Полученные значения $S_{мин}$ и $S_{макс}$ означают, что с вероятностью P величина S_x лежит между ними. С учетом доверительных интервалов S_x далее рассчитываются доверительные интервалы погрешности измерения.

Рассмотрим пример. S_x = 0.03, *n* = 3. Оценим границы доверительных интервалов.

1. Принимаем P=0.95.

2. По табл. 6 для P=0.95 и *n* = 3 находим γ_1 = 0.52, γ_2 = 6.3.

3. $S_{мин}$ = 0.52 0.03 = 0.015, $S_{макс}$=0.19. Так, с вероятностью 0.95 S_x может находиться в интервале от 0.015 до 0.19.

Следует помнить, что величина среднеквадратического отклонения выборки сама по себе хотя и несет некоторую информацию о параметрах выборки, но не является достаточной характеристикой. Об этом нельзя забывать и считать статистическую обработку законченной.

Пример. При определении состава синтезированного в опыте плагиоклаза получили путем замеров на микрозонде 10 значений X^{Pl}_{An}: 0.30,0.31, 0.28, 0.29, 0.32, 0.31, 0.27, 0.29, 0.29, 0.30. Необходимо определить среднее арифметическое и среднеквадратическую ошибку (S_x) и доверительные интервалы для S_x.

1. Обозначим X^{Pl}_{An} за X, X_1=*0.3,* X_2= 0.31, ..., X_{10}= 0.30.

2. Вычислим среднее

$$X = \frac{X_1 + \ldots + X_{10}}{10} = 0.296 \approx 0.30$$

3. Вычислим S_x

$$S_x = \sqrt{\frac{(0.30 - 0.30)^2 + (0.30 - 0.31)^2 + \ldots + (0.30 - 0.30)^2}{10 - 1}} = 0.015 \approx 0.02.$$

4. Оценим границы доверительного интервала для S_x (n = 10, задаем P= 0.95), по табл. 6 находим (для n = 10 и P= 0.95) величины γ_1 и γ_2 : γ_1 = 0.69, γ_2 =1.8, $S_{мин}$=0.02 0.69 = 0.014 ± 0.01, $S_{макс}$=0.02 1.8 = 0.036± 0.04.

5. Среднее значение X^{Pl}_{An}= 0.30; среднеквадратическая погрешность S_x= 0.02.

6. С вероятностью 0.95 $0.04 \geq S_x \geq 0.01$

Коэффициентом вариации результатов наблюдений (измерений) является относительная величина среднеквадратического отклонения:

$V_x = [S_x / \overline{X} n]$ 100%.

Коэффициент вариации позволяет сравнивать влияние случайных погрешностей на результат измерения в разных сериях или проводимых различными методами.

Приложение Б
(справочное)
Практическая работа 2
Исключение выпадающих (анормальных) результатов измерений («промахи»)

Очень часто при замерах (определениях) какой-либо величины возникают сомнения: надо ли отбрасывать результаты замера, несколько отличающихся от всех, какова значимость такого отклонения. Может быть два варианта существования "анормальных" замеров.

1. Замер принадлежит к той же генеральной совокупности, но вероятность его появления мала. В этом случае его исключать нельзя, и расчеты среднего арифметического и среднеквадратического отклонения необходимо проводить с учетом этого замера.

2. Отклоняющийся результат - следствие погрешности в записи (промаха) и не подчиняется случайным законам отклонения от генерального среднего. В этом случае его надо отбросить.

Решение задачи об отбрасывании какого-либо значения надо проводить с большой осторожностью, предварительно проанализировав условия, в которых он получен. Может быть удастся оценить достоверность этого результата и без вероятностного подхода. В противном случае нужно воспользоваться следующими методами.

1. Среди n результатов находят $X_{мин}$ и $X_{макс}$, которые подлежат проверке.

2. Подсчитывают среднее данной выборки:

$$\overline{X} = \frac{X_{мин} + X_2 + \ldots + X_{макс}}{n}.$$

3. Подсчитывают выборочное среднеквадратическое отклонение:

$$S_X = \sqrt{\frac{\left(X_{мин} - \overline{X}\right)^2 + \left(X_2 - \overline{X}\right)^2 + \ldots + \left(X_{макс} - \overline{X}\right)^2}{n-1}}.$$

4. Находят следующие отношения:

$$U_{макс} = \frac{X_{макс} - \overline{X}}{S_X} \text{ и } U_{мин} = \frac{\overline{X} - X_{мин}}{S_X}.$$

5.Принимают необходимый доверительную вероятность (для наших целей P=0.95).

6. Находят величину β по табл. Б.1 при принятом значении P и выборке объема *n*.

7. $U_{макс}$ и $U_{мин}$, полученные в п. 4, сравнивают с величиной β по п. 6 . Если $U_{макс} \geq \beta$, то проверяемый результат может быть исключен.

Пример. При определении состава синтетического санидина получены следующие содержания K_2O в минерале: 13,1; 12,9; 13,3; 14,1 весовых процентов.

1. Сомнительное значение 14,1.

2. $\bar{X} = \frac{13.1+12.9+13.3+14.1}{4} = 13.4$

3. $S_x = \sqrt{\frac{(13.4-13.1)^2 + (13.4-12.9)^2 + (13.4+13.3)^2 + (13.4-14.1)^2}{4-1}} = 0.5.$

4. $U = \frac{14.111 - 13.44}{0.5} = 1.4.$

5. Принимаем P= 0.95.

6. Для P= 0.95 и n =4 β = 1.46 (по табл. 27). U< β (1.4<1.46), результат 14.1 не может быть исключен.

Другой пример. Было получено 5 значений pH для равновесия минерал - раствор: 4.3, 4.2, 4.3, 4.1, 5.3

1. Необходимо проверить 5.3 .

2.` X=4.4 .

3. $S_x = \sqrt{\frac{(4.4-4.3)^2 + (4.4-4.2)^2 + (4.4-4.3)^2 + (4.4-4.1)^2 + (4.4-5.3)^2}{5-1}} = 0.5$

4. $U = \frac{5.3 - 4.4}{0.5} = 1.8.$

5. Принимаем α= 0.95.

6. По таблице Б.1 β = 1.67 (n = 5, α= 0.95).

7. U> β , результат 5.3 можно исключить.

Таблица Б.1 Коэффициенты β для различных значений доверительной вероятности P.

β	Доверительный интервал P		
n	0.90	0.95	0.99
3	1.15	1.15	1.15
4	1.42	1.46	1.48
5	1.60	1.67	1.72
6	1.73	1.82	1.89
7	1.83	1.94	2.02
8	1.91	2.03	2.13
9	1.98	2.11	2.21
10	2.03	2.18	2.29
11	2.09	2.23	2.36
12	2.13	2.29	2.41
13	2.17	2.33	2.47
14	2.21	2.37	2.50
15	2.25	2.41	2.55
16	2.28	2.44	2.58
18	2.34	2.50	2.66
20	2.38	2.56	2.71

Приложение В
(справочное)

Практическая работа 3

Оценка границ доверительного интервала величины погрешности для малых выборок.

Погрешность анализа определяется по формуле

$$\varepsilon = \pm \frac{t_{an} S_X}{\sqrt{n}},$$

где S_x - среднеквадратическое отклонение, t_n - коэффициент Стьюдента для оценки погрешности при малых n ($n \leq 20$).

Стьюдент - псевдоним английского химика В.Госсета, предложившего в 1908 г. применять коэффициент t_n.

Фактически t_n применяется вместо Z при n<10. При n стремящемся к бесконечности распределение Стьюдента совпадает с нормальным распределением с единичной дисперсией: $t_n = \frac{\varepsilon}{S_x}$; значения коэффициентов приведены в таблице В.1

Таблица В.1 Значения коэффициентов Стьюдента t_n (для двусторонней проверки).

	Доверительная вероятность Р						
n	0.3	0.5	0.8	0.9	0.95	0.99	0.999
2	0.51	1.00	3.1	6.3	12.7(6.3)*	63.7	636.6
3	0.45	0.82	1.9	2.9	4.3(2.9)	9.9	31.6
4	0.42	0.77	1.6	2.4	3.2(2.4)	5.8	12.9
5	0.41	0.74	1.5	2.1	2.8(2.1)	4.6	8.6
6	0.41	0.73	1.5	2.0	2.6(2.0)	4.0	6.9
7	0.40	0.72	1.4	1.9	2.4(1.9)	3.7	6.0
8	0.40	0.71	1.4	1.9	2.4(1.9)	3.5	5.4
9	0.40	0.71	1.4	1.9	2.3(1.9)	3.4	5.0
10	0.40	0.70	1.4	1.8	2.3(1.8)	3.3	4.8
12	0.40	0.70	1.4	1.8	2.2(1.8)	3.1	4.3
14	0.39	0.69	1.4	1.8	2.2(1.8)	3.0	4.2
16	0.39	0.69	1.4	1.8	2.2(1.8)	2.9	4.0
20	0.39	0.69	1.3	1.7	2.1(1.7)	2.9	3.9
30	0.39	0.68	1.3	1.7	2.0(1.7)	2.8	3.7
¥	0.39	0.67	1.3	1.6	2.0(1.6)	2.6	3.3

*В скобках даны величины t_n для Р= 0.95 при односторонней проверке. Проверка называется двусторонней или односторонней в зависимости от того, как оценивать погрешности величины Х - по обе стороны среднего значения (±) или по одну сторону от среднего соответственно.

Рассмотрим еще пример. При измерении плотности минерала получен ряд следующих значений (n=5): 2.75, 2.78, 2.76, 2.77, 2.76. Определить среднее значение и границы доверительного интервала при вероятности P= 0.95.

1. Вычислим $$X = \frac{2.75 + 2.78 + 2.76 + 2.77 + 2.76}{5} = 2.76$$

$$S_x = \sqrt{\frac{(2.75-2.76)^2 + (2.78-2.76)^2 + (2.76-2.76)^2 + (2.77-2.76)^2 + (2.76-2.76)^2}{5-1}}$$
$= 0.06.$

2. Вычислим S_X

3. По табл. 27 находим: для P= 0.95 и n= 5 t_n = 2.78.

4. Находим $$\varepsilon = \pm \frac{t_{an} Sx}{\sqrt{n}} = \frac{2.78 \cdot 0.06}{\sqrt{5}} = 0.07$$, если n<20, то $\varepsilon = t_n S_x$.

5. Итак, плотность минерала $\overline{X}$ = 2.76± 0.07, т.е. вероятность отклонения в замерах за интервал ± 0.07 - 5%.

Приложение Г
(справочное)

Практическая работа 4

Сравнение двух выборочных средних при известных параметрах двух выборок.

В практике петрологического эксперимента часто возникает вопрос о значимости различий двух (двух или больше) серий замеров. Например, изменился ли состав минерала в результате опыта (произошло ли смещение реакции) или нет? Для этого необходимо выполнить статистический анализ.

Ход анализа. Гипотеза: средние значения обеих серий замеров совпадают, т.е. в пределах точности различия нет.

1. Устанавливают объем выборок n_1 и n_2.

2. Вычисляют S_1 и S_2 для обеих выборок. Вычисляют $S_{1,2}$:

$$S_{1,2} = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}.$$

3. Вычисляют $$t_{ak}^{p} = \frac{X_1 - X_2}{S_{1,2}\sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}$$

4. Принимают доверительную вероятность (P= 0.95).

5. Определяют, какую проверку надо произвести (скорее всего, двустороннюю).

6. По значению P и n находим табличное значение t_n (см. табл.). При этом надо учесть, что по таблице $n=n_1+n_2-1$.

7. Сравнивают абсолютную величину t^p_n с t_n:

а) если $t^p_n > t_n$, гипотеза отбрасывается, т.е. результаты статистически значимы.

б) если $t^p_n \leq t_n$, гипотеза принимается, т.е. разница величин статистически не значима.

Рассмотрим пример. В ходе реакции мольная доля Mg в гранате изменилась от X^{Gr}_{Mg} = 0.21 до X^{Gr}_{Mg} =0.24. Можно ли приписать это изменение только погрешности анализа (другими словами, считать, что состав граната не изменился)? Условия: S_1 и S_2 (для исходного и конечного материалов навески граната) соответственно равны 0.005 и 0.020 при n_1 = 10 и n_2 = 5.

Гипотеза: средние значения не отличаются друг от друга.

1. S_1 = 0.005 и S_2 = 0.02.

2. $$t^{p}_{эк} = \frac{0.24 - 0.21}{0{,}012\sqrt{\frac{1}{10} + \frac{1}{5}}} = 4.55.$$

3. Принимаем P= 0.95.

4. Для *P*= 0.95 и двусторонней проверки n =10+5-1=14, t_n = 2.2 (см. табл. 28).

5. Сравниваем рассчитанную величину (t^p_n) с табличным t_n : $t^p_n > t_n$ (4.55 > 2.2). Таким образом, с вероятностью 0.95 произошла реакция с изменением состава граната.

Еще пример. В одном шлифе габбро найдены 2 зерна плагиоклаза состава An_{50} и An_{55} (X^{Pl}_{Ca} = 0.50 и 0.55 соответственно). Можно ли считать составы плагиоклазов одинаковыми? Условия : $S_1 = S_2$ = 0.03, $n_1 = n_2$= 3, P= 0.95.

1. Рассчитываем $S_{1,2}$:

$$S_{1,2} = \sqrt{\frac{(3-1)(0.03)^2 + (3-1)(0.03)^2}{3+3-2}} = 0.03.$$

2. Рассчитываем t^p_n:

$$t^{p}_{эк} = \frac{0.55 - 0.50}{0.03\sqrt{\frac{1}{3} + \frac{1}{3}}} = 2.04 \approx 2.0.$$

3. Находим по табл. 28 значения t_n. *n*=3+3-1=5. t_n=2.8.

4. Сравниваем t^p_n и t_n:

$t^p_n < t_n$.

Таким образом, составы плагиоклазов (An_{50} и An_{55}) значимо не различаются, и разница в составах обусловлена лишь погрешностями в определении составов плагиоклазов.

Приложение Г

(справочное)

Практическая работа 5

Аппроксимация экспериментальных зависимостей методом наименьших квадратов (МНК)

До сих пор мы рассматривали погрешности при измерениях какой - либо одной величины. Но бывают случаи, когда необходимо определить зависимость между двумя величинами (X и Y). К ним относятся:

- Оценка силы связи (корреляции) между величинами X и Y.
- Нахождение аналитической зависимости между величинами X и Y (нахождение уравнения регрессии).
- Оценка степени аппроксимации данной зависимости уравнением регрессии.

Примерами могут служить широко используемые зависимости коэффициента распределения компонентов между фазами от температуры ($\ln K_D = A\ 10^3/T+B$) и от состава X одной из фаз ($\ln K_D = AX^2+BX+C$).

Расчет коэффициентов корреляции. Прежде чем находить аналитическую зависимость между величинами X и Y, следует определить, существует ли связь между этими двумя параметрами (например, иногда неясно, зависит ли коэффициент распределения элемента между фазами от состава фаз или от f_{O2} и т.д.). Для решения подобного рода задач проводят корреляционный анализ.

Допустим, что у нас есть набор значений двух величин X и Y. Мы хотим проверить, существует ли зависимость между этими величинами, и оценить ее значимость. Для этого необходимо рассчитать *выборочный коэффициент корреляции* r_{XY}:

$$r_{XY} = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2 \sum (Y_i - \bar{Y})^2}}.$$

Полученные значения r_{XY} сравнивают с табличными значениями (табл. 8) для заданной доверительной вероятности и числа экспериментальных данных *n*. Обычно доверительную вероятность (P) выбирают 0.95, что подходит для большинства экспериментальных исследований. Если рассчитанный r_{XY} больше соответствующего (для заданных n и ***P***) значения коэффициента корреляции из таблицы Г.1, то связь между величинами X и Y значима с вероятностью P.

Рассмотрим расчет коэффициента корреляции на конкретном примере**.** Пусть для некоторых двух фаз получен набор значений коэффициентов распределения элементов ($\ln K_D \cong Y$) для приведенной температуры $t^* = 10^3/T \cong X$. Необходимо определить, зависит ли величина $\ln K_D$ (Y) от t*(X) и велика ли эта связь.

1. Расчеты удобно вести по приведенной формуле, записывая результаты в таблицу типа таблицы Г.2.

Рассчитаем коэффициент корреляции: $r_{XY} = \frac{0.532}{\sqrt{1.099 \cdot 0.274}} = 0.969.$

Таблица Г.1 Значения коэффициентов корреляции (r_{XY}) для различных доверительных вероятностей.

$(r_{X,Y})$	Доверительная вероятность P		
n	0.90	0.95	0.99
2	0.988	0.997	1.000
3	0.900	0.950	0.990
4	0.805	0.878	0.959
5	0.729	0.811	0.917
6	0.669	0.754	0.874
7	0.621	0.707	0.834
8	0.582	0.666	0.798
9	0.549	0.632	0.765
10	0.521	0.602	0.735
12	0.476	0.553	0.684
14	0.441	0.514	0.641
15	0.412	0.482	0.606
18	0.389	0.456	0.575
20	0.369	0.433	0.549
25	0.322	0.381	0.487
30	0.296	0.349	0.449
40	0.257	0.304	0.393
50	0.231	0.273	0.354
60	0.211	0.250	0.325
80	0.183	0.217	0.283
100	0.164	0.195	0.254

Таблица Г.2 Расчет коэффициента корреляции.

n	X_i	Y_i	$X_i - \overline{Y}$	$Y_i - \overline{Y}$	$(X_i - \overline{X})(Y_i - \overline{Y})$	$(X_i - \overline{X})^2$	$(Y_i - \overline{Y})^2$
1	1.00	0.21	- 0.43	- 0.23	0.099	0.185	0.053
2	1.10	0.30	- 0.33	- 0.14	0.046	0.109	0.020
3	1.15	0.28	- 0.28	-0.16	0.045	0.078	0.026
4	1.20	0.27	- 0.23	-0.17	0.039	0.053	0.029
5	1.20	0.38	- 0.23	-0.06	0.014	0.053	0.004
6	1.30	0.37	- 0.13	-0.07	0.009	0.017	0.005
7	1.40	0.43	- 0.03	-0.01	0.000	0.001	0.000
8	1. 40	0.48	- 0.03	0.04	-0.001	0.001	0.002
9	1.50	0.45	0.07	0.01	0.001	0.005	0.000
10	1.60	0.56	0.17	0.12	0.020	0.029	0.014
11	1.70	0.57	0.27	0.13	0.035	0.073	0.017
12	1.80	0.58	0.37	0.14	0.052	0.137	0.020
13	1.80	0.63	0.37	0.19	0.070	0.137	0.036
14	1.90	0.66	0.47	0.22	0.103	0.221	0.048
S	20.05	6.17	-	-	0.532	1.099	0.274
Среднее	1.43	0.44	-	-	-	-	-

2. Задаем доверительную вероятность P = 0.95.

3. Сравниваем расчетную величину r_{XY} = 0.969 с табличными данными (табл. 30) для n = 14, P = 0.95.

4. Расчетный r_{XY} (0.969) больше, чем табличное значение (0.514). Следовательно, существует значимая (на уровне 0.95) связь между lnK_D и t*.

Теперь надо найти **аналитическую зависимость** между ln K_D и t* или в общем случае функциональную зависимость вида Y = f (X).

В результате эксперимента мы получаем для значений аргумента (X_1, X_2, ..., X_n) набор значений функций (Y_1, Y_2, ..., Y_n). Если соединить последовательно точки Y_1, Y_2, ..., Y_n ломаной линией, она не является графическим изображением функции Y = f (X), так как при повторении данной серии опытов мы получим ломаную линию, отличную от первой. Значит, измеренные значения Y будут отклоняться от истинной кривой Y = f (X*)* вследствие статистического разброса. Наша задача состоит в том, чтобы аппроксимировать экспериментальные данные гладкой (не ломаной) кривой, которая проходила бы как можно ближе к истинной зависимости Y = f(X).

Теория вероятности показывает, что наилучшим приближением будет такая кривая (или прямая) линия, для которой сумма квадратов расстояний по вертикали от точек до кривой будет минимальной. Метод нахождения кривой, соответствующей этому условию, и называется *методом наименьших квадратов* (МНК). Фактически это условие минимума соответствует предположению, что разброс точек Yi относительно кривой Y = f (X*)* подчиняется закону нормального распределения. Мерой этого распределения является среднеквадратическое отклонение:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left[Y_i - Y(X_i)\right]^2}{n-1}} = \frac{1}{\sqrt{n-1}}\sum \Delta Y_i^*.$$

Требование минимального разброса соответствует минимальному значению этого среднего квадрата. Обычно форму кривой Y = f (X) задают полиномами вида:

$$Y(X) = \alpha_0 + \alpha_1 X + \alpha_2 X^2 + \ldots + \alpha_m X^m.$$

Нахождение коэффициентов этого полинома сводится к минимизации S_x методами математического анализа, к решению уравнений вида:

$$\sum_{j=1}^{n}\left(Yi - \sum_{k=0}^{m} \alpha_k t_j^k\right) t_j^i = 0,$$

где i = 0, 1, 2, ..., *n*; j = 0, 1, 2, ...,*m; m* < *n*-1.

Для решения этих уравнений применяют итерациональный (численный) метод. Фактически без применения компьютера расчет (подбор) коэффициентов αфункции Y = f (X) можно проводить лишь для линейной зависимости: $Y = \alpha_1 X + \alpha_0$ (т.е. $Y = \alpha X + b$).

Для степени m>1 расчет коэффициента α_m выполняется на компьютерах.

Приложение Д
(справочное)
Практическая работа 6
Расчет параметров линейной зависимости $Y = \alpha X + b$.

Приведем уравнения, позволяющие рассчитывать величины a и b без их вывода.

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i Y_i) - \bar{X}\sum_{i=1}^{n} Y_i}{\sum_{i=1}^{n}(X_i)^2 - \bar{X}\sum_{i=1}^{n} Xi}; b = \bar{Y} - \alpha\bar{X}.$$

Продолжим рассмотрение предыдущего *примера,* в котором для некоторых 2 фаз была получена следующая зависимость ln K_D(Y) от обратной температуры t* = 10^3 /T(X). Запишем линейное уравнение связи ln K_D(Y) = at*(X) + *b*.

Вычислим величины $X; Y; X_i; Y_i; \sum_{i=1}^{n} Y_i; X_i^2; \sum_{i=1}^{n}(X_i)^2; Y_i^2; \sum_{i=1}^{n}(Y_i)^2$.

Вычисление удобно представить в виде таблицы (таблица Д.1)

Таблица Д.1**.** Расчет параметров линейной зависимости.

n	X_i	Y_i	X_iY_i	Y_i^2	X_i^2
1	1.00	0.21	0.21	0.044	1.00
2	1.10	0.30	0.33	0.090	1.21
3	1.15	0.28	0.32	0.078	1.32
4	1.20	0.27	0.32	0.073	1.44
5	1.20	0.38	0.46	0.144	1.44
6	1.30	0.37	0.48	0.137	1.69
7	1.40	0.43	0.60	0.185	1.96
8	1.40	0.48	0.67	0.230	1.96
9	1.50	0.45	0.68	0.203	2.25
10	1.60	0.56	0.90	0.314	2.56
11	1.70	0.57	0.97	0.325	2.89
12	1.80	0.58	1.04	0.336	3.24
13	1.80	0.63	1.13	0.397	3.24
14	1.90	0.66	1. 25	0.436	3.61
å	20.05	6.17	9.36	2.992	29.81
Среднее	1.43	0.44	0.67	0.213	2.13

Вычислим параметры a и b:

$$\alpha = \frac{9.36 - (1.43 \cdot 6.17)}{29.81 - (1.43 \cdot 20.05)} = \frac{0.537}{1.139} = 0.471,$$
$$b = 0.44 - 0.471 \cdot 1.43 = -0.234.$$

Итак, зависимость **Y = aX + b** или ln K_D = at* +b выражается линейным уравнением ln K_D = 0.471t* - 0.234.

Приложение Е

(справочное)

Практическая работа 7

Расчет точности аппроксимации данных уравнением *Y = aX + b* [1].

Оценив связи между X и Y (t* и ln K_D) (коэффициент корреляции) и найдя линейное уравнение связи, необходимо оценить степень аппроксимации линейным уравнением этой зависимости. Это можно сделать, рассчитывая среднеквадратическое отклонение расчетных значений (Y_p) от экспериментальных (Y_i):

$$S_Y^* = \sqrt{\frac{\sum (Y_i - Y_p)^2}{n-1}}.$$

Затем рассчитывают погрешность аппроксимации (ε_Y*) по критерию, предварительно задав доверительную вероятность:

$$\varepsilon_Y^* = \frac{t_{an} S_Y^*}{\sqrt{n}}.$$

Рассчитаем значение S_{Y*} и ε_{Y*} для зависимости ln K_D = 0.471t* - 0.234 (таблица Е.1).

Таблица Е.1 Расчет точности аппроксимации.

n	X_i	Y_i	Y_p	$Y_i - Y_p$	$(Y_i - Y_p)^2$
1	1.00	0.21	0.24	- 0.03	0.0009
2	1.10	0.30	0.28	0.02	0.0004
3	1.15	0.28	0.31	- 0.03	0.0009
4	1.20	0.27	0.33	- 0.06	0.0036
5	1.20	0.38	0.33	0.05	0.0025
6	1.30	0.37	0.38	- 0.01	0.0001
7	1.40	0.43	0.43	0.00	0.0000
8	1.40	0.48	0.43	0.05	0.0025
9	1.50	0.45	0.47	- 0.02	0.0004
10	1.60	0.56	0.52	0.04	0.0016
11	1.70	0.57	0.57	0.00	0.0000
12	1.80	0.58	0.61	- 0.03	0.0009
13	1.80	0.63	0.61	0.02	0.0004
14	1.90	0.66	0.66	0.00	0.0000
å	-	-	-	-	0.0142

[1] Подобный расчет можно проводить и для уравнений более высоких степеней.

1. Рассчитаем для заданных X_i по найденному уравнению Y = 0.471X - 0.234 значения Y_p; $(Y_i - Y_p)$; $(Y_i - Y_p)^2$ (табл.13).

2. Вычислим S_{Y*}:

$$S_Y^* = \sqrt{\frac{0.0142}{14-1}} = 0.033$$

3. Выберем ***P***= 0.95 и по табл. 28 для n =14 найдем t_n = 2.2.

4. Вычислим величину ε_Y*:

$$\varepsilon_Y^* = \frac{t_{an} S_Y^*}{\sqrt{n}} = \frac{2.2 \cdot 0.033}{\sqrt{14}} = 0.22$$

Итак, уравнение Y= 0.471X - 0.234 описывает экспериментальную зависимость ln K_D = (Y) от t* (X) с погрешностью 0.02 для доверительной вероятности P= 0.95. Практически это означает, что с вероятностью 0.95 все экспериментальные точки будут находиться в пределах ± 0.02 от расчетной прямой.

Порядок обработки зависимости двух параметров следующий:

1. Рассчитывается коэффициент корреляции r_{XY}.

2. По табл. 10 оценивается (для выбранного значения Ри количества пар X и Y-n) значимость связи X и Y.

3. Находятся коэффициенты линейного уравнения связи $Y = \alpha X + b$.

4. Вычисляется S^*_Y (среднеквадратическое отклонение кривой $Y = \alpha X + b$ от экспериментальных точек).

5. Задаем доверительную вероятность P. Обычно P= 0.95.

6. По табл. 28 находим значение t_n для выбранного Ри количества точек (пар) - n.

7. Рассчитываем погрешность аппроксимации по формуле:

$$\varepsilon_Y^* = \pm \frac{t_{an} Sx}{\sqrt{n}},$$

Приложение Ж
(справочное)

Алгоритм обработки результатов измерений

В заключение напомним **порядок статистической обработки серии измерений**. С подобной работой наиболее часто приходится сталкиваться экспериментатору:

1. Вычисляется среднее арифметическое выборки (из n результатов измерений):

$$X = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} X_i .$$

2. Находятся погрешности отдельных измерений: $\Delta = X - X_i$.

3. Вычисляется среднеквадратическое отклонение результатов измерений:

$$S_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta X_i^2}{n-1}}$$

4. Если один результат измерений (или несколько) резко отличается от остальных, то следует проверить, не является ли этот результат промахом, предварительно выбрав уровень значимости q (для большинства наших измерений q = 0.95.

5. Определяется коэффициент Стьюдента $t_{p,n}$ для доверительной вероятности P и числа измерений n (см.табл).

6. Находят границы доверительного интервала:

Доверительные границы в случае нормального закона распределения вычисляются как

$$\pm tS/\sqrt{n}\,,\ \pm tS_{\bar{x}}\,,$$
$$\Delta x = S_x \cdot t_{P,n}$$

где S, $S_{\bar{x}}$ - средние квадратические отклонения (погрешности), соответственно, единичного и среднего арифметического результатов измерений;

где $t_{p,n}$ - коэффициент Стьюдента, зависящий от доверительной вероятности P и числа измерений n.

$$S_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}\,, \qquad \varepsilon = t_{an}\frac{S_x}{\sqrt{n}}.$$

7. Окончательный результат записывается в виде $X = \overline{X} \pm \varepsilon$;

8. Вычисляется коэффициент вариации данной серии замеров: $V_x = \frac{S_x}{\overline{X}} 100\%$.

Приложение З
(справочное)
Измерения физических величин

З.1 измерение физической величины;

Совокупность операций по применению технического средства, хранящего единицу физической величины, обеспечивающих нахождение соотношения (в явном или неявном виде) измеряемой величины с ее единицей и получение значения этой величины.

Примеры

1 В простейшем случае, прикладывая линейку с делениями к какой-либо детали, по сути сравнивают ее размер с единицей, хранимой линейкой, и, произведя отсчет, получают значение величины (длины, высоты, толщины и других параметров детали).

2 С помощью измерительного прибора сравнивают размер величины, преобразованной в перемещение указателя, с единицей, хранимой шкалой этого прибора, и проводят отсчет.

Примечания

1 Приведенное определение понятия "измерение" удовлетворяет общему уравнению измерений, что имеет существенное значение в деле упорядочения системы понятий в метрологии. В нем учтена техническая сторона (совокупность операций), раскрыта метрологическая суть измерений (сравнение с единицей) и показан гносеологический аспект (получение значения величины).

2 От термина "измерение" происходит термин "измерять", которым широко пользуются на практике. Все же нередко применяются такие термины, как "мерить", "обмерять", "замерять", "промерять", не вписывающиеся в систему метрологических терминов. Их применять не следует.

Не следует также применять такие выражения, как "измерение значения" (например, мгновенного значения напряжения или его среднего квадратического значения), так как значение величины - это уже результат измерений.

3 В тех случаях, когда невозможно выполнить измерение (не выделена величина как физическая и не определена единица измерений этой величины) практикуется *оценивание* таких величин по условным шкалам

З.2 равноточные измерения

Ряд измерений какой-либо величины, выполненных одинаковыми по точности средствами измерений в одних и тех же условиях с одинаковой тщательностью.

Примечание - Прежде чем обрабатывать ряд измерений, необходимо убедиться в том, что все измерения этого ряда являются равноточными

З.3 неравноточные измерения

Ряд измерений какой-либо величины, выполненных различающимися по точности средствами измерений и (или) в разных условиях.

Примечание - Ряд неравноточных измерений обрабатывают с учетом веса отдельных измерений, входящих в ряд

З.4 однократное измерение

Измерение, выполненное один раз.

Примечание - Во многих случаях на практике выполняются именно однократные измерения. Например, измерение конкретного момента времени по часам обычно производится один раз

З.5 многократное измерение

Измерение физической величины одного и того же размера, результат которого получен из нескольких следующих друг за другом измерений, т.е. состоящее из ряда однократных измерений

3.6 статическое измерение

Измерение физической величины, принимаемой в соответствии с конкретной измерительной задачей за неизменную на протяжении времени измерения.

Примеры

1 Измерение длины детали при нормальной температуре.

2 Измерение размеров земельного участка

3.7 динамическое измерение

Измерение изменяющейся по размеру физической величины.

Примечания

1 Терминоэлемент "динамическое" относится к измеряемой величине.

2 Строго говоря, все физические величины подвержены тем или иным изменениям во времени. В этом убеждает применение все более и более чувствительных средств измерений, которые дают возможность обнаруживать изменение величин, ранее считавшихся постоянными, поэтому разделение измерений на динамические и статические является условным

3.8 абсолютное измерение

Измерение, основанное на прямых измерениях одной или нескольких основных величин и (или) использовании значений физических констант.

Пример - Измерение силы $F = mg$ основано на измерении основной величины - массы m и использовании физической постоянной g (в точке измерения массы).

Примечание - Понятие *абсолютное измерение* применяется как противоположное понятию *относительное измерение* и рассматривается как измерение величины в ее единицах. В таком понимании это понятие находит все большее и большее применение

3.9 относительное измерение

Измерение отношения величины к одноименной величине, играющей роль единицы, или измерение изменения величины по отношению к одноименной величине, принимаемой за исходную.

Пример - Измерение активности радионуклида в источнике по отношению к активности радионуклида в однотипном источнике, аттестованном в качестве эталонной меры активности

3.10 прямое измерение

Измерение, при котором искомое значение физической величины получают непосредственно.

Примечание - Термин *прямое измерение* возник как противоположный термину *косвенное измерение*. Строго говоря, измерение всегда прямое и рассматривается как сравнение величины с ее единицей. В этом случае лучше применять термин *прямой метод измерений*.

Примеры

1 Измерение длины детали микрометром.

2 Измерение силы тока амперметром.

3 Измерение массы на весах

3.11 косвенное измерение

Определение искомого значения физической величины на основании результатов прямых измерений других физических величин, функционально связанных с искомой величиной.

Пример - Определение плотности D тела цилиндрической формы по результатам прямых измерений массы m, высоты h и диаметра цилиндра d, связанных с плотностью уравнением

$$D = \frac{m}{0{,}25\pi d^2 h}.$$

Примечание - Во многих случаях вместо термина *косвенное измерение* применяют термин *косвенный метод измерений*

3.12 совокупные измерения

Проводимые одновременно измерения нескольких одноименных величин, при которых искомые значения величин определяют путем решения системы уравнений, получаемых при измерениях этих величин в различных сочетаниях.

Примечание - Для определения значений искомых величин число уравнений должно быть не меньше числа величин.

Пример - Значение массы отдельных гирь набора определяют по известному значению массы одной из гирь и по результатам измерений (сравнений) масс различных сочетаний гирь

3.13 совместные измерения

Проводимые одновременно измерения двух или нескольких неодноименных величин для определения зависимости между ними

3.14 наблюдение при измерении

Операции, проводимые при измерении и имеющие целью своевременно и правильно произвести отсчет.

Примечание - Не следует заменять термин *измерение* термином *наблюдение*

3.15 вид измерений

Часть области измерений, имеющая свои особенности и отличающаяся однородностью измеряемых величин.

Пример - В области электрических и магнитных измерений могут быть выделены как виды измерений: измерения электрического сопротивления, электродвижущей силы, электрического напряжения, магнитной индукции и др.

3.16 подвид измерений

Часть вида измерений, выделяющаяся особенностями измерений однородной величины (по диапазону, по размеру величины и др.).

Пример - При измерении длины выделяют измерения больших длин (в десятках, сотнях, тысячах километров) или измерения сверхмалых длин - толщин пленок

3.17 физическая величина

Одно из свойств физического объекта (физической системы, явления или процесса), общее в качественном отношении для многих физических объектов, но в количественном отношении индивидуальное для каждого из них.

3.18 Измеряемая физическая величина;

Физическая величина, подлежащая измерению, измеряемая или измеренная в соответствии с основной целью измерительной задачи

3.19 размер физической величины;

Количественная определенность физической величины, присущая конкретному материальному объекту, системе, явлению или процессу

3.20 значение физической величины;

Выражение размера физической величины в виде некоторого числа принятых для нее единиц

3.21 числовое значение физической величины;

Отвлеченное число, входящее в значение величины

3.22 истинное значение физической величины;

Значение физической величины, которое идеальным образом характеризует в качественном и количественном отношении соответствующую физическую величину.

Примечание - Истинное значение физической величины может быть соотнесено с понятием абсолютной истины. Оно может быть получено только в результате бесконечного процесса измерений с бесконечным совершенствованием методов и средств измерений

3.23 действительное значение физической величины;

Значение физической величины, полученное экспериментальным путем и настолько близкое к истинному значению, что в поставленной измерительной задаче может быть использовано вместо него

3.24 результат измерения физической величины;

Значение величины, полученное путем ее измерения

3.25 неисправленный результат измерения;

Значение величины, полученное при измерении до введения в него поправок, учитывающих систематические погрешности

3.26 исправленный результат измерения;

Полученное при измерении значение величины и уточненное путем введения в него необходимых поправок на действие систематических погрешностей

3.27 сходимость результатов измерений;

сходимость измерений

Близость друг к другу результатов измерений одной и той же величины, выполненных повторно одними и теми же средствами, одним и тем же методом в одинаковых условиях и с одинаковой тщательностью.

Примечание - Сходимость измерений двух групп многократных измерений может характеризоваться размахом, средней квадратической или средней арифметической погрешностью

3.28 воспроизводимость результатов измерений

Близость результатов измерений одной и той же величины, полученных в разных местах, разными методами, разными средствами, разными операторами, в разное время, но приведенных к одним и тем же условиям измерений (температуре, давлению, влажности и др.).

Примечание - Воспроизводимость измерений может характеризоваться средними квадратическими погрешностями сравниваемых рядов измерений

3.29 ряд результатов измерений

Значения одной и той же величины, последовательно полученные из следующих друг за другом измерений

3.30 среднее взвешенное значение величины;

Среднее значение величины из ряда неравноточных измерений, определенное с учетом веса каждого единичного измерения (см. 8.8).

Примечание - Среднее взвешенное значение иногда называют *средним весовым*

3.31 вес результата измерений;

Положительное число (p), служащее оценкой доверия к тому или иному отдельному результату измерения, входящему в ряд неравноточных измерений.

Примечание - В большинстве случаев принято считать, что веса входящих в ряд неравноточных измерений обратно пропорциональны квадратам их средних квадратических погрешностей, т.е. $p_i = 1/S_i^2$. Для простоты обычно результату с большей погрешностью приписывают вес, равный единице (p =1), а остальные веса находят по отношению к нему.

ПРИЛОЖЕНИЕ И

(справочное)

Систематические погрешности

Систематические погрешности можно подразделить на следующие группы.

1. Погрешности, природа которых нам известна и величина которых может быть достаточно точно определена. Такие погрешности могут быть исключены введением соответствующих поправок. К погрешностям такого рода можно отнести "дрейф" рентгеновского дифрактометра: для каждой серии замеров можно ввести поправку, введя так называемый "стандарт" - вещество, для которого точно известны положения пиков на дифрактограммах. Определив поправки, можно проводить дальнейшие измерения, не вводя стандарт в исследуемый образец.

2. Другой вид систематических погрешностей - это погрешности известного происхождения, но неизвестной величины. К их числу относятся погрешности измерительных приборов. Если на приборе указан класс точности 0,5, то это означает, что показания прибора верны с точностью до 0,5% от всей действующей шкалы прибора. Систематической погрешностью такого типа будет погрешность в определении давления манометром (класс 0.5), рассчитанного на измерение давления 4000 атм. Это значит, что давление мы измеряем с точностью 0.5% от всей шкалы, т.е. 20 атм. Систематические погрешности этого типа не могут быть исключены, но их наибольшее значение, как правило, известно. Если, измеряя давление, мы получили значение 2000 атм, то можем написать P= 2000± 20. Здесь ± 20 означает, что давление лежит в пределах от 1980 до 2020.

3. Третий вид систематических погрешностей - самый опасный, это погрешности, о существовании которых мы не подозреваем, хотя величина их может быть очень значительна. Они чаще всего появляются при сложных измерениях. Иногда бывает, что величина, которая измерена, как нам кажется, с точностью 2 - 3%, оказывается в 2 - 3 раза больше или меньше найденной величины. Например, измеряя скорость диффузии какого - либо элемента в твердой фазе, мы можем не учесть, что в данном образце существует сеть дислокаций, за счет которых скорость диффузии увеличится в несколько раз. Распознать такую ошибку будет трудно, т. к. повторные замеры распределения компонентов на микроанализаторах будут давать одну и ту же картину, а краевые зоны разных образцов будут иметь одну и ту же высокую плотность дислокаций. Такая погрешность может быть выявлена только при тщательной проверке всех этапов эксперимента, используя разные методики приготовления образцов и т. п.

Таким образом, при проведении эксперимента необходимо тщательно проанализировать все возможные источники систематических погрешностей и исключить их (если это возможно).

Разделение систематических и случайных погрешностей до некоторой степени условно. Можно предвидеть ситуацию, в которой систематическая погрешность неизвестного происхождения будет трудно выявляться и не учитываться. В то же время источниками случайных погрешностей могут быть неконтролируемые изменения параметров эксперимента в сложной системе: изменения внешней (по отношению к изучаемой системе) среды, неоднородность материала исходной навески. Фактически, если эти изменения происходят достаточно быстро, то они должны рассматриваться как фактор, способствующий появлению случайных погрешностей.

Случайные погрешности неустранимы из опытных данных, но они могут быть выявлены и количественно оценены при математической обработке экспериментальных данных, в чем и заключается основная цель статистического анализа.

Интересно рассмотреть соотношения величин систематических и случайных погрешностей. Возможны два случая. 1) Величина систематической погрешности больше величины случайной. В этом случае, проводя серию опытов, мы будем получать постоянные значения какой - либо величины; подобный вариант встречается сравнительно редко и чаще всего связан с недостаточной чувствительностью измерительного прибора. 2) Случайные погрешности больше систематических. Ясно, что для повышения точности измерений в первом случае надо уменьшать величину систематической погрешности (повысить чувствительность прибора) до тех пор, пока она не станет меньше случайной погрешности. Во втором - необходимо уменьшить величину случайной погрешности, это можно сделать, увеличивая количество измерений. В работе экспериментатора чаще всего встречается вторая ситуация, и повысить точность измерений можно, только увеличивая их число. Это не всегда возможно из соображений времени, экономики и т.д. В этом случае мы можем только приближенно оценить нижний предел возможной погрешности по так называемым приборным погрешностям. Реальная величина погрешности может быть значительно выше.

ПРИЛОЖЕНИЕ К
(справочное)
Запись чисел. Правила округления

Результаты любого эксперимента выражаются цифрами. Запись должна быть подчинена определенным правилам, произвол в этом деле недопустим. В этом смысле говорят о правильной и неправильной записи результатов. Следует иметь в виду, что неправильная запись может значительно обесценивать результаты даже блестящей экспериментальной работы, поэтому вопрос этот более серьезен, чем может показаться. Общее правило записи таково: она должна содержать только значащие цифры. Значащими считаются все цифры, кроме нулей в начале десятичной дроби (слева от запятой) и нулей в конце числа, если они поставлены вместо неизвестных цифр.

Рассмотрим пример. В качестве условий проведения опыта указано P = 30 000 бар. Если все эти цифры значащие, то нули обозначают отсутствие единиц соответствующих разрядов, другими словами, мы ручаемся за то, что точность нашего измерения давления не хуже ± 1 бар. На самом деле это далеко не так: точность ниже на три порядка. Поэтому приведенная запись неверна, она создает совершенно ложное представление о точности эксперимента. Правильной записью будет 30 х 10^3 бар или 30 кбар. В такой записи только две значащие цифры, и последняя из них соответствует реальной точности эксперимента.

Другой пример. В результате серии измерений определена плотность ρ = 13,60 г / см ^{3}. В этой записи 4 значащие цифры, т.е. плотность измерена с точностью до единицы во втором знаке после запятой - до ± 0,01 г/см^3 . Если бы реальная точность составляла только ± 0,1 г/см^3, правильной записью было бы 13,6 г/см^3. Пусть, однако, при реальной точности ± 0,01 г/см^3 шкала измерительного прибора позволяет получать значение в следующем разряде (тысячные доли г/см^3). Как поступить с этими значениями? Очевидно, что просто отбросить их было бы неверно, ибо значения, например, 13,615 и 13,605 г/см^3 заметно отличаются. Такие цифры (в данном случае 0,00n г/см^3) называются сомнительными; это значит, что n может принимать любое значение в пределах от 1 до 10. При записи результатов можно поступать двояко:

а) отбрасывать все приближенные цифры,

б) оставлять последней приближенную цифру ("принцип А.Н. Крылова"). Например, число 1,9931 (0,0031 - сомнительные цифры) записывается в первом варианте как 1,99, а во втором – 1,993 (сохраняя последнюю сомнительную цифру 3).

В приведенных примерах мы провели *округление* результата. Округлением числа называется уменьшение числа значащих цифр. Правила округления сводятся к следующему:

- *если отбрасывается цифра меньше 5, то предпоследняя цифра оставляется без изменения: 1,9932 → 1,993;*
- *если отбрасывается цифра больше 5, то предпоследняя цифра увеличивается на единицу: 1,9937→ 1,994;*
- *если отбрасывается цифра 5, то предпоследняя цифра:*

останется неизменной, если перед ней четное число: 1,9925 → 1,992.

увеличится на единицу, если перед ней нечетное число: 1,9935 → 1,994.

Запись надо вести так, чтобы все значащие цифры были верны, и лишь последняя была бы приближенной:

не Д = 1,4231 ± 0,005, а 1,413 ± 0,005, не Р = 38,742 ± 0,04 , а 38,74 ± 0,04.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

(справочное)

Оценка погрешности косвенных измерений

При косвенных измерениях искомая физическая величина А является функцией величин X, У , Z ...., которые могут быть получены с помощью прямых измерений. Результат косвенного измерения записывается в виде:

$$A \pm \Delta A$$

где $A = f(X, Y, Z, \ldots)$ - значение искомой величины, рассчитанное по средним значениям параметров X , Y, Z, ..., каждый из которых измеряется, как правило, по несколько раз. ΔА - абсолютная погрешность косвенного измерения. зависящая от погрешностей параметров X , Y , Z, ... (т.е. от ΔX , ΔY , ΔZ , ...).

В простейших случаях абсолютную и относительную погрешность косвенных измерений подсчитать нетрудно. Рассмотрим несколько примеров.

Пусть А = X + У. Если известны погрешности ΔX и ΔY , то

$$A \pm \Delta A = (X \pm \Delta X) + (Y \pm \Delta Y)$$

Максимальное значение погрешности равно при этом

$$\Delta A = \Delta X + \Delta Y.$$

Такова же будет максимальная абсолютная погрешность при A = X – Y.

Таким образом, относительные погрешности величин, являющихся суммой или разностью двух параметров, равны соответственно :

$$E = \frac{\Delta X + \Delta Y}{X + Y} \quad \text{и} \quad E = \frac{\Delta X + \Delta Y}{X - Y}$$

Пусть теперь A = X·Y - тогда

$$A \pm \Delta A = (X \pm \Delta X)(Y \pm \Delta Y) = X \cdot Y \pm X \cdot \Delta Y \pm Y \cdot \Delta X + \Delta X \cdot \Delta Y$$

Пренебрегая слагаемым второго порядка малости |ΔX· ΔY| имеем:

$$\Delta A = X \cdot \Delta Y + Y \cdot \Delta X$$

$$E = \frac{X \cdot \Delta Y + Y \cdot \Delta X}{X \cdot Y} \quad \text{или} \quad E = \frac{\Delta X}{X} + \frac{\Delta Y}{Y}$$

Если $A = \frac{X}{Y}$, то $A \pm \Delta A = \frac{X \pm \Delta X}{Y \pm \Delta Y}$.

Максимальное значение погрешности ΔА получится в случае, если погрешности в числителе и в знаменателе данного выражения взять с разными знаками. Тогда можно записать:

$$A \pm \Delta A = \frac{X + \Delta X}{Y - \Delta Y} = \frac{(X + \Delta X)(Y + \Delta Y)}{(Y - \Delta Y)(Y + \Delta Y)} = \frac{XY + Y \cdot \Delta X + X \cdot \Delta Y}{Y^2}$$

Здесь мы пренебрегли членами $(\Delta Y)^2$ и ΔX· ΔY . Максимальная абсолютная погрешность равна в этом случае

$$\Delta A = \frac{Y \cdot \Delta X + X \cdot \Delta Y}{Y^2},$$

а относительная погрешность равна

$$\frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta X}{X} + \frac{\Delta Y}{Y}$$

Полученные результаты легко обобщаются на произвольное количество сомножителей. Если в самом общем случае

$$A = C\frac{X^{\alpha} \cdot Y^{\beta} \cdot ...}{Z^{\gamma}},$$

где C — постоянный коэффициент, а α, β, γ, ... — любые целые или дробные числа, то относительную погрешность косвенного измерения величины A можно записать в виде :

$$E = \frac{\Delta A}{A} = \alpha\frac{\Delta X}{X} + \beta\frac{\Delta Y}{Y} + \gamma\frac{\Delta Z}{Z} + ...$$

Простота последнего выражения указывает на то, что в большинстве случаев удобно оценить сначала относительную погрешность косвенного измерения, а потом уже найти его абсолютную погрешность. Следует, однако, обратить внимание на то обстоятельство, что приведенные формулы применимы только в том случае, если параметры X , Y , Z , ... не зависят друг от друга. Если же, к примеру, $A = Z/Y$, где Z = X + Y расчет приведет к неправильному результату, т.к. погрешности одной и той же величины Y будут приписаны различные знаки, поскольку указанная величина фигурирует как в числителе, так и в знаменателе исходного выражения.

Более общие правила вычисления погрешностей, позволяющие избежать подобных ошибок, можно получить, используя дифференциальное исчисление.

Пусть по-прежнему A = *f*(X, Y, Z, …) . Тогда относительную погрешность косвенного измерения $E = \frac{\Delta A}{A}$ можно записать в виде $E = \frac{dA}{A}$. С другой стороны, $\frac{dA}{A} = d(\ln A)$ Таким образом, относительная погрешность величины A равна полному дифференциалу натурального логарифма функции, определяющей зависимость данной величины от измеряемых, т.е.

Таким образом, для нахождения $E = \frac{\Delta A}{A}$ необходимо:

1) Прологарифмировать исходную формулу ln A = ln *f(X, Y, Z, ...)*

2) Продифференцировать полученное уравнение, заменив затем дифференциалы dA , dX , dY ... погрешностями ΔA , ΔX , ΔY , ... ;

3) Сгруппировать члены, содержащие одни и те же погрешности, вынести эти погрешности за скобки, а выражения в скобках взять по модулю;

4) заменить знаки “-” перед коэффициентами при погрешностях на знак “+” (для нахождения максимального значения Δ).

Общая формула для расчета относительной погрешности будет при этом выглядеть следующим

образом:

$$E = \frac{\Delta A}{A} = \left|\frac{1}{f}\frac{df}{dX}\right|\Delta X + \left|\frac{1}{f}\frac{df}{dY}\right|\Delta Y + \left|\frac{1}{f}\frac{df}{dZ}\right|\Delta Z + \ldots .$$

В качества примера приведем оценку относительной погрешности величины γ, вычисляемой по формуле $\gamma = \frac{H}{H-h}$, где средние значения параметров, полученные после проведения серии измерений (отсчеты по шкале манометра).

$$\ln\gamma = \ln H - \ln(H-h)$$

$$\frac{d\gamma}{\gamma} = \frac{dH}{H} - \frac{d(H-h)}{H-h} = \frac{dH}{H} - \frac{dH}{H-h} + \frac{dh}{H-h}$$

$$\frac{\Delta\gamma}{\gamma} = \left|\frac{1}{H} - \frac{1}{H-h}\right|\Delta H + \left|\frac{1}{H-h}\right|\Delta h = \left|\frac{-h}{H(H-h)}\right|\Delta H + \left|\frac{1}{H-h}\right|\Delta h$$

Надо сказать, что расчет по формуле приводит, как правило, к завышению погрешности результата косвенных измерений. Причем это завышение зависит от числа параметров X, Y, Z, ... Если, например, имеется пять таких параметров, то вероятность того, что все ошибки будут иметь заданный знак равна $1/16$. При большем их числе указанная вероятность будет еще меньше. Таким образом, понятно, что максимально возможное значение относительной погрешности, даваемое этим выражением, во многих случаях значительно больше реальной погрешности результата.

Теория вероятностей дает более правильные формулы для оценки погрешностей косвенных измерений. Если при прямых измерениях параметров X, Y, Z ... доминирующей является случайная погрешность, то погрешность косвенного измерения также является случайной величиной. Это означает, что следует искать среднюю квадратичную погрешность результата. Так, если A = X + У, то вместо выражений указанных выше будем иметь :

$$A_{кв} = \sqrt{(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2} \quad \text{и} \quad E = \frac{\sqrt{(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2}}{X + Y}$$

Общая формула для расчета относительной погрешности будет в этом случае иметь следующий вид :

$$\frac{\Delta A}{A} = \frac{1}{f}\sqrt{\left(\frac{df}{dX}\Delta X\right)^2 + \left(\frac{df}{dY}\Delta Y\right)^2 + \left(\frac{df}{dZ}\Delta Z\right)^2 + \ldots}$$

или

$$\frac{\Delta A}{A} = \sqrt{\left(\frac{d\ln f}{dX}\Delta X\right)^2 + \left(\frac{d\ln f}{dY}\Delta Y\right)^2 + \left(\frac{d\ln f}{dZ}\Delta Z\right)^2 + \ldots}$$

В частности, при $A = C\frac{X^{\alpha}\cdot Y^{\beta}\cdot\ldots}{Z^{\gamma}}$ имеем: $\frac{\Delta A}{A} = \frac{1}{f}\sqrt{\left(\alpha\frac{\Delta X}{X}\right)^2 + \left(\beta\frac{\Delta Y}{Y}\right)^2 + \left(\gamma\frac{\Delta Z}{Z}\right)^2 + \ldots}$

Таблица Г.1

№	Вид функции $R=f(X,Y,Z)$	Абсолютная погрешность (ε)	Относительная погрешность , $Q = \varepsilon / R$
1	$A X + B X$	$\sqrt{A^2\varepsilon_X^2 + B^2\varepsilon_Y^2}$	$\frac{\sqrt{A^2\varepsilon_X^2 + B^2\varepsilon_Y^2}}{AX + BY}$
2	$A X - B X$	$\sqrt{A^2\varepsilon_X^2 + B^2\varepsilon_Y^2}$	$\frac{\sqrt{A^2\varepsilon_X^2 + B^2\varepsilon_Y^2}}{AX - BY}$
3	$AX+BY+CZ$	$\sqrt{A^2\varepsilon_X^2 + B^2\varepsilon_Y^2 + C^2\varepsilon_Z^2}$	$\frac{\sqrt{A^2\varepsilon_X^2 + B^2\varepsilon_Y^2 + C^2\varepsilon_Z^2}}{AX + BY + CZ}$
4	$X Y$	$\sqrt{(\overline{X})^2\varepsilon_X^2 + (Y)^2\varepsilon_Y^2}$	$\sqrt{\frac{\varepsilon_X^2}{(X)^2} + \frac{\varepsilon_Y^2}{(Y)^2}}$
5	$XY Z$	$\sqrt{(Y)^2(Z)^2\varepsilon_X^2 + (Z)^2(X)^2\varepsilon_Y^2 + (X)^2(Y)^2\varepsilon_Z^2}$	$\sqrt{\frac{\varepsilon_X^2}{X^2} + \frac{\varepsilon_Y^2}{Y^2} + \frac{\varepsilon_Z^2}{Z^2}}$
6	X / Y	$\frac{\sqrt{Y^2\varepsilon_X^2 + X^2\varepsilon_Y^2}}{Y^2}$	$\sqrt{\frac{\varepsilon_X^2}{(X)^2} + \frac{\varepsilon_Y^2}{(Y)^2}}$
7	$X / X + Y$	$\frac{\sqrt{Y^2\varepsilon_X^2 + X^2\varepsilon_Y^2}}{(X+Y)^2}$	$\frac{\sqrt{Y^2\varepsilon_X^2 + X^2\varepsilon_Y^2}}{X(\overline{X}+Y)}$
8	$XY + Z$	$\sqrt{Y^2\varepsilon_X^2 + X^2\varepsilon_Y^2 + \varepsilon_Z^2}$	$\frac{\sqrt{Y^2\varepsilon_X^2 + X^2\varepsilon_Y^2 + \varepsilon_Z^2}}{X \cdot Y + Z}$

Библиография

- Зайдель А.Н. Элементарные оценки погрешностей измерений. - Л, 1968.
- Кассандрова О.Н., Лебедев В.В. Обработка результатов наблюдений. - М, 1970.
- Котельников Р.Б. Статистическая обработка экспериментальных данных. Вып. 7 (33), М, 1960.
- Налимов В.В. Применение математической статистики при анализе вещества. - М, 1960.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебно-методическому комплексу
_____ С.А. Упоров

ПРАКТИКУМ ПО ПЕТРОФИЗИКЕ

Часть 1

Специальность:

21.05.03 Технология геологической разведки

форма обучения: очная, заочная

Автор: Александрова Ж. Н.

Екатеринбург

2020

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО
«Уральский государственный горный университет»

Ж. Н. Александрова

ПРАКТИКУМ ПО ПЕТРОФИЗИКЕ

Часть 1

Руководство по выполнению лабораторных работ
по дисциплине «Петрофизика» для студентов
специализации «Геофизические методы исследования скважин»
специальности 21.05.03 Технология геологической разведки
очной и заочной форм обучения

Екатеринбург
2020

ФГБОУ ВО
«Уральский государственный горный университет»

ОДОБРЕНО
Методической комиссией
факультета геологии и геофизики УГГУ
«20» марта 2020 г.
Председатель комиссии


_____ проф. В.И. Бондарев

Ж. Н. Александрова

ПРАКТИКУМ ПО ПЕТРОФИЗИКЕ

Часть 1

Руководство по выполнению лабораторных работ
по дисциплине «Петрофизика» для студентов
специализации «Геофизические методы исследования скважин»
специальности 21.05.03 Технология геологической разведки
очной и заочной форм обучения

Издание УГГУ Екатеринбург, 2020

УДК 550.83
А46

Рецензент: *Писецкий В. Б.*, д-р геол.-мин. наук, профессор, зав. кафедрой геоинформатики УГГУ

Руководство рассмотрено на заседании кафедры геофизики
5 марта 2020 г. (протокол № 12)
и рекомендовано к изданию в УГГУ

Александрова Ж. Н.

А46 ПРАКТИКУМ ПО ПЕТРОФИЗИКЕ. Часть 1: руководство по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Петрофизика» для студентов специализации «Геофизические методы исследования скважин» специальности 21.05.03 Технология геологической разведки очной и заочной форм обучения. / Ж. Н. Александрова; Уральский гос. горный ун-т. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2020. – 36 с.

Успешное использование геофизических методов в нефтегазовой отрасли возможно только при детальном изучении петрофизических характеристик горных пород. Это в особенности относится к геофизическим методам исследования скважин, так как по данным определения физических свойств не только выделяются отдельные разности пород, но и с высокой точностью устанавливаются их элементный состав, содержание полезных ископаемых и т.д.

В практикуме для каждой работы дано краткое изложение теоретических основ и порядок ее выполнения.

Практикум предназначен для студентов, обучающихся по направлению «Технология геологической разведки» со специализацией «Геофизические методы исследования скважин».

© Александрова Ж. Н., 2020 ©
Уральский государственный
горный университет, 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ ……...……...… 4

Лабораторная работа № 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ ПО ДАННЫМ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА……..... 6

Лабораторная работа № 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЩЕЙ И ОТКРЫТОЙ ПОРИСТОСТИ ОБРАЗЦОВ 8

Лабораторная работа № 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТКРЫТОЙ ПОРИСТОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД 11

Лабораторная работа № 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВЯЗИ МЕЖДУ КОЭФФИЦИЕНТОМ ПОРИСТОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД И ИХ УДЕЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЕМ .....……. 15

Лабораторная работа № 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВЯЗИ МЕЖДУ КОЭФФИЦИЕНТОМ ПОРИСТОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД И СКОРОСТЬЮ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ……. 20

Лабораторная работа № 6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД ПО КРИВОЙ КАПИЛЛЯРНОГО ДАВЛЕНИЯ …...25

Лабораторная работа № 7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ СВОБОДНОЙ, ФИЗИЧЕСКИ И ХИМИЧЕСКИ СВЯЗАННОЙ ВОДЫ ПО ДАННЫМ ТЕРМОГРАВИТОГРАММЫ ……...…… 28

Лабораторная работа № 8. ИЗУЧЕНИЕ НЕОБРАТИМОГО УПЛОТНЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ……..…….. 31

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ ……... 36

ВВЕДЕНИЕ

Изучение геологических разрезов скважин геофизическими методами имеет ряд существенных преимуществ перед способами, основанными на анализе керна.

Во-первых, бурение скважин с отбором керна требует в несколько раз бóльших затрат средств и времени, чем бескерновое бурение.

Во-вторых, современные способы отбора керна при глубоком бурении недостаточно совершенны: при большой глубине скважины из интервала бурения на поверхность выносится не весь керн, а только его часть. Поэтому данные керна не обеспечивают полного изучения разрезов скважин, особенно коллекторов нефти и газа, представленных рыхлыми отложениями.

В-третьих, при отборе керна и выносе его на поверхность нередко нарушается его структура, что не позволяет точно определить коллекторские свойства пород.

В-четвертых, отобранные образцы керна имеют малые размеры, которые не дают полного представления о коллекторе в целом, что важно для его промышленной оценки. Геофизические методы позволяют изучать горные породы как в микро- так и в макрообъемах, т. е. получать интегральные значения исследуемых свойств, которые объективнее характеризуют коллектор.

В-пятых, геофизические методы позволяют изучать породы в условиях их естественного залегания. Это повышает точность определения изучаемых параметров, например, пористости и проницаемости, которые зависят от действующих давления и температуры.

Высокая эффективность геофизических методов исследования разрезов скважин объясняется достаточно тесной связью между структурой, минеральным составом пород и их физическими свойствами – удельным электрическим сопротивлением, плотностью, интервальным временем пробега упругих волн, естественной радиоактивностью и др. Поэтому горные породы и полезные ископаемые могут быть детально изучены по комплексу физических свойств.

При исследовании нефтегазовых месторождений изучение физических свойств осадочных пород необходимо для количественного определения их коллекторских свойств и нефтегазонасыщения.

Петрофизические исследования позволяют получить четкие зависимости между физическими (плотность, удельное электросопротивление, радиоактивность и др.) и коллекторскими свойствами гор-

ных пород (пористость, проницаемость, нефтегазонасыщенность, глинистость и др). Эти зависимости лежат в основе интерпретации результатов измерения в скважинах – они позволяют определять коллекторские и иные свойства пород по зарегистрированным значениям физических параметров. Кроме того, одно и то же коллекторское свойство (например, пористость) может быть определено по различным физическим параметрам, что значительно повышает точность его оценки.

Современные способы компьютерной обработки результатов измерений в скважинах позволяют получать информацию об изменении коллекторских свойств и главнейших литологических признаков пород в наглядной графической форме.

Достоверность оценки коллекторских свойств и нефтегазонасыщения пород по геофизическим данным в основном обуславливается степенью изученности их физических свойств и качеством регистрации измеряемых физических параметров в скважине.

К сожалению, изучению физических свойств керна из промысловых и разведочных районов не всегда уделяется такое же внимание как его петрографическим и палеонтологическим исследованиям. Это отражается на качестве интерпретации данных геофизических методов.

Информация о физических свойствах пород необходима для установления достоверных связей, которые, в конечном итоге, позволяют перейти на высокоэффективное бескерновое бурение скважин.

Лабораторная работа № 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ ПО ДАННЫМ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА

Под ***удельной поверхностью пористой среды*** понимают полную поверхность твердых частиц, образующих твердую фазу этой среды, отнесенную к единице массы твердой фазы, или полную поверхность поровых каналов среды, отнесенную к единице объема пористой среды.

В инженерной геологии, петрографии удельную поверхность $S_{тв}$ относят к единице массы твердой фазы и выражают в м^2/г. В петрофизике принято относить удельную поверхность к единице объема породы и выражают ее в м$^{-1}$ (см$^{-1}$). Для перехода от значения $S_{тв}$ в м^2/г к значению $S_п$ в м$^{-1}$ пользуются соотношением

$$S_п = S_{тв}\,\delta_{тв}(1-k_п), \qquad (1.1)$$

где $\delta_{тв}$ – плотность твердой фазы в г/см^3; $k_п$ – коэффициент пористости в отн. единицах.

Удельную поверхность $S_п$ можно определять на ненарушенном образце, $S_{тв}$ – на порошке, приготовленном путем дезинтегрирования минерального скелета без нарушения его первоначальной дисперсности.

Удельную поверхность пористой породы можно определить, используя данные о ее гранулометрическом составе.

Так, для пористой среды, образованной зернами сферической формы с одинаковым диаметром $d_з$, полная удельная поверхность $S_п$ определяется формулой

$$S_п = 6(1-k_п)\,d_з^{-1}, \qquad (1.2)$$

где $d_з$ выражен в см, а $S_п$ – в см$^{-1}$.

Если пористая среда образована сферическими зернами различного размера, предположим, несколькими группами зерен с постоянным значением $d_з$ в каждой группе, то при одинаковой плотности зерен $\delta_{тв}$

$$S_п = 6(1-k_п)\sum_{i=1}^{n} p_i\, d_{зi}^{-1}, \qquad (1.3)$$

где p_i – весовое содержание; $d_{зi}$ – диаметр зерен i-й фракции.

Если форма зерен отличается от сферической, что характерно для реальных обломочных пород, например, для песчаников и алевролитов, то

$$S_п = 6\,f(1-k_п)\sum_{i=1}^{n} p_i\, d_{эфi}^{-1}, \qquad (1.4)$$

где f >1 – коэффициент, учитывающий отличие формы зерна от сферической; $d_{эф}$ – эффективный диаметр несферического зерна, принимаемого за сферическое.

Приведенную выше формулу можно использовать для расчета S_n песков и алевритов, слабосцементированных песчаников и алевролитов, лишенных глинистого и др. видов высокодисперсного цемента. Сведения о гранулометрическом составе глинистой фракции при стандартном анализе не получают. Но даже при наличии сведений о гранулометрическом составе глинистой компоненты расчет не имеет смысла, так как геометрия глинистых частиц сложна и аппроксимировать их зернами правильной формы нет оснований.

Задание

Для образца керна пористой горной породы массой 100 г определен коэффициент пористости $k_п$, гранулометрический состав и коэффициент несферичности зерен. Результаты представлены в табл. 1.1. Рассчитать удельную поверхность пористой среды (УППС) для данной породы, используя зависимость (1.4).

Таблица 1.1

Данные для расчета УППС

Вариант	Масса частиц с диаметром $d_{эф}$, г				f	$k_п$, отн. ед.
	0 см $<d_{эф}<10^{-4}$см	10^{-4}см $<d_{эф}<10^{-3}$см	10^{-3}см $<d_{эф}<10^{-2}$см	10^{-2}см $<d_{эф}<10^{-1}$см		
1	0	20	50	30	1,1	0,3
2	0	10	60	30	1,15	0,28
3	0	15	50	35	1,2	0,29
4	0	12	58	30	1,18	0,31
5	0	22	50	28	1,19	0,27
6	0	21	45	34	1,17	0,26
7	0	10	55	35	1,16	0,29
8	0	18	42	40	1,12	0,28
9	0	22	60	18	1,14	0,32
10	0	26	40	34	1,13	0,29
11	0	20	30	50	1,12	0,3
12	0	60	10	30	1,1	0,28

Лабораторная работа № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЩЕЙ И ОТКРЫТОЙ ПОРИСТОСТИ ОБРАЗЦОВ

Между общей $k_п$ и открытой $k_{по}$ пористостью существует тесная линейная связь (рис. 2.1). При этом $k_п = ak_{по} + b$, где a – коэффициент, характеризующий наклон графика; b – коэффициент, отражающий закрытую пористость $k_{пз}=k_п - k_{по}$. Значение коэффициента корреляции приближается к единице.

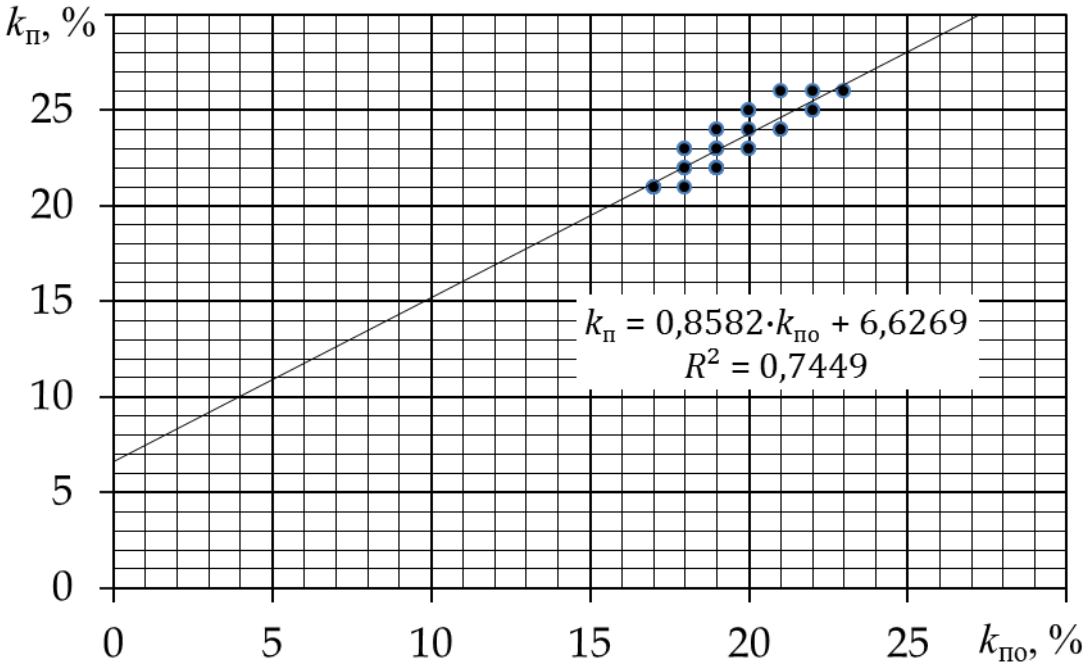


Рис. 2.1. Связь между общей и открытой пористостью

Задание

По результатам исследования образцов керна пористой горной породы были определены их общая $k_п$ и открытая пористости $k_{по}$. Данные приведены в табл. 2.1.

1. С помощью регрессионного анализа установите связь между общей и открытой пористостью образцов. Рекомендуется использовать приложение Exel.
2. Определите величину закрытой пористости по исследуемому интервалу.
3. Результаты представьте в виде графика уравнения регрессии, как это показано на рис. 2.1.

Таблица 2.1

Данные исследования образцов горных пород

	Вариант											
	1		***2***		***3***		***4***		***5***		***6***	
Номер образца	$k_{по}$, %	$k_{п}$, %	$k_{по}$, %	$k_{п}$, %	$k_{по}$, %	$k_{п}$, %	$k_{по}$, %	$k_{п}$, %	$k_{по}$, %	$k_{п}$, %	$k_{по}$, %	$k_{п}$, %
1	20	25	30	34	24	30	28	34	32	36	17	20
2	18	21	21	27	28	34	25	31	35	40	23	27
3	18	22	22	28	26	32	29	35	30	35	21	25
4	19	22	20	24	28	34	28	33	34	38	23	26
5	17	21	23	29	27	32	26	31	30	34	18	22
6	18	23	22	27	22	28	30	36	34	37	19	23
7	19	22	25	30	24	30	29	34	35	39	22	25
8	20	24	21	27	23	29	26	31	31	36	17	20
9	19	24	22	26	27	32	30	37	30	34	19	24
10	20	23	28	33	23	28	25	32	30	35	21	24
11	20	25	28	33	25	31	25	32	33	37	19	24
12	17	21	21	27	25	31	27	34	32	36	22	27
13	19	22	21	27	26	32	27	33	30	33	21	26
14	21	26	23	27	28	33	28	34	32	35	23	26
15	18	23	20	26	24	29	29	35	33	37	22	25
16	19	23	24	29	22	28	28	35	32	37	22	27
17	23	26	25	29	25	31	30	37	31	35	22	27
18	19	24	23	28	23	29	30	37	30	34	18	21
19	22	25	20	24	29	34	25	31	34	38	20	24
20	18	22	21	26	22	27	30	35	34	37	17	22
21	21	24	28	34	23	29	28	34	35	38	18	22
22	19	23	22	26	25	30	28	34	32	36	21	24
23	19	23	21	26	24	29	26	32	33	37	17	22
24	22	26	26	30	26	31	28	33	35	40	19	23
25	21	24	28	34	27	33	26	33	33	36	20	23
26	19	22	28	32	28	33	26	31	35	39	19	22
27	17	21	22	28	24	30	28	34	32	36	22	27
28	20	23	23	29	25	31	30	35	30	34	20	23
29	20	25	23	29	25	30	26	31	33	38	19	24
30	22	25	25	30	27	33	29	36	35	38	21	24

Продолжение табл. 2.1

	Вариант											
	7		***8***		***9***		***10***		***11***		***12***	
Номер образца	$k_{по}$, %	$k_{п}$, %	$k_{по}$, %	$k_{п}$, %	$k_{по}$, %	$k_{п}$, %	$k_{по}$, %	$k_{п}$, %	$k_{по}$, %	$k_{п}$, %	$k_{по}$, %	$k_{п}$, %
1	18	21	18	21	28	34	24	30	30	34	20	25
2	22	25	22	25	25	31	28	34	21	27	18	21
3	19	23	19	23	29	35	26	32	22	28	18	22
4	23	26	23	26	28	33	28	34	20	24	19	22
5	21	25	21	25	26	31	27	32	23	29	17	21
6	22	26	22	26	30	36	22	28	22	27	18	23
7	20	24	20	24	29	34	24	30	25	30	19	22
8	22	26	22	26	26	31	23	29	21	27	20	24
9	18	22	18	22	30	37	27	32	22	26	19	24
10	20	23	20	23	25	32	23	28	28	33	20	23
11	21	26	21	26	25	32	25	31	28	33	20	25
12	23	28	23	28	27	34	25	31	21	27	17	21
13	17	20	17	20	27	33	26	32	21	27	19	22
14	19	22	19	22	28	34	28	33	23	27	21	26
15	20	24	20	24	29	35	24	29	20	26	18	23
16	21	25	21	25	28	35	22	28	24	29	19	23
17	23	26	23	26	30	37	25	31	25	29	23	26
18	23	27	23	27	30	37	23	29	23	28	19	24
19	17	22	17	22	25	31	29	34	20	24	22	25
20	21	26	21	26	30	35	22	27	21	26	18	22
21	18	22	18	22	28	34	23	29	28	34	21	24
22	20	24	20	24	28	34	25	30	22	26	19	23
23	21	25	21	25	26	32	24	29	21	26	19	23
24	17	20	17	20	28	33	26	31	26	30	22	26
25	18	23	18	23	26	33	27	33	28	34	21	24
26	20	25	20	25	26	31	28	33	28	32	19	22
27	18	22	18	22	28	34	24	30	22	28	17	21
28	23	28	23	28	30	35	25	31	23	29	20	23
29	18	22	18	22	26	31	25	30	23	29	20	25
30	19	23	19	23	29	36	27	33	25	30	22	25

Лабораторная работа № 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТКРЫТОЙ ПОРИСТОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД

Пористость – фундаментальное свойство породы, от которого зависит большинство ее физических свойств.

По происхождению поры делятся на *первичные*, которые сформировались в момент образования горной породы, и *вторичные*, возникшие уже после образования породы, в процессе ее литогенеза.

Структура порового пространства пород обусловлена гранулометрическим составом частиц, их формой, химическим составом пород, происхождением пор, а также соотношением количества больших и малых пор.

Размер пор и каверн характеризуется эффективным диаметром $d_{эф}$. По размерам поры делятся на следующие группы:

а) сверхкапиллярные поры ($d_{эф} > 0{,}1$ мм);

б) капиллярные поры ($d_{эф}=0{,}0001 \div 0{,}1$ мм);

в) субкапиллярные поры ($d_{эф}=0{,}000002 \div 0{,}0001$ мм);

г) микропоры ($d_{эф} < 0{,}000002$ мм).

Сверхкапиллярные поры характерны для слабосцементированных галечников, гравия, крупно- и среднезернистых песков и др. Доля воды, связанной с твердой фазой капиллярными силами и силами адсорбции в таких порах, сравнительно невелика. Поэтому пластовая вода в них может двигаться в основном под действием силы тяжести по законам гидродинамики.

Капиллярные поры характерны для сцементированных песчаников, обломочных и кристаллических известняков, доломитов. Движения воды под действием силы тяжести нет, т. е. вода в этих порах удерживается капиллярными силами. Сверхкапиллярные и капиллярные поры составляют основную часть терригенных коллекторов.

Субкапиллярные поры свойственны глинам, мелкокристаллическим и мелоподобным известнякам и другим тонкозернистым породам. В таких порах велика доля воды, на которую действуют адсорбционные силы со стороны твердой фазы. Поры заполнены рыхло- и прочносвязанной водой, которая не способна к перемещению под действием силы тяжести или под влиянием сил поверхностного натяжения. В отсутствие трещиноватости эти породы не являются коллекторами.

Микропоры установлены у некоторых природных цеолитов.

По характеру связи между порами и движению флюидов в породе различают общую, открытую, эффективную и динамическую пористости.

Коэффициент общей пористости характеризует объем всех пор, как сообщающихся между собой (или открытых), так и не сообщающихся (закрытых). Общую пористость рассчитывают по соотношению плотностей сухой породы и минеральных зерен:

$$k_{\text{п}} = \frac{V_{\text{п}}}{V} = \frac{V - V_{\text{тв}}}{V}, \qquad (3.1)$$

где V – объем сухой породы; $V_{\text{тв}}$ – объем твердой фазы в породе;

Коэффициент открытой пористости характеризует объем пор, сообщающихся между собой и с окружающей средой.

$$k_{\text{по}} = \frac{V_{\text{по}}}{V}, \qquad (3.2)$$

где $V_{\text{по}}$ – объем открытых пор.

Коэффициент эффективной пористости характеризует полезную емкость породы для углеводородов (нефти и газа) и представляет собой объем открытых пор за вычетом объема, заполненного физически связанной и капиллярно-удержанной пластовой водой.

Коэффициент эффективной пористости $k_{\text{п.эф}}$ вычисляется так:

$$k_{\text{п.эф}} = \frac{V_{\text{по}} - V_{\text{в.св}}}{V} = k_{\text{по}}(1 - k_{\text{в.св}}), \qquad (3.3)$$

где $V_{\text{в.св}}$ – объем связанной воды; $k_{\text{в.св}}$ – коэффициент водонасыщения, определяющий содержание связанной воды в единице объема пор.

Однако не весь объем нефти или газа, заполняющих полезную емкость горных пород, можно привести в движение при разработке месторождений. Определенная их часть, находящаяся в мелких и тупиковых порах, при давлении закачиваемой в пласт вытесняющей жидкости остается в порах без движения.

Коэффициент динамической пористости $k_{\text{п.д}}$ показывает долю объема породы, в которой при заданном градиенте давления может наблюдаться движение жидкости и газа.

$$k_{\text{п.д}} = \frac{V_{\text{д.п}}}{V}, \qquad (3.4)$$

где $V_{\text{д.п}}$ – объем динамических пор.

Наибольший практический интерес (при подсчете запасов нефти и газа) представляет открытая пористость.

Открытую пористость образцов коллекторов нефти и газа обыч-

но измеряют путем насыщения жидкостью.

С очищенным и высушенным при T=105 °С до постоянного веса образцом производят следующее:

1) взвешивают в воздухе (P_1);
2) насыщают в жидкости;
3) взвешивают гидростатически (P_2) в той же жидгости, которой насыщен образец;
4) взвешивают насыщенный образец в воздухе (P_3).

По результатам взвешивания вычисляют открытую пористость:

$$k_{\text{по}} = \frac{P_3 - P_1}{P_3 - P_2} 100\ \% = \frac{V_{\text{п}}}{V} 100\ \%, \qquad (3.5)$$

где $P_3 - P_1$ – вес жидкости в поровом пространстве образца; $P_3 - P_2$ – вес объема жидкости, равного объему образца (вес жидкости в объеме образца).

Задание

1. Экстрагированный и высушенный образец взвесить в воздухе ($P_{\text{сух}}$).
2. Обвязать образец тонкой проволокой ($d \approx 1$ мм) длиной 15–20 см с петлей на конце, поместить в стакан с водой и насытить под вакуумом до прекращения выделения пузырьков воздуха (в течение 30–40 мин.).
3. Насыщенный образец прикрепить петлей к крючку сережки аналитических весов и взвесить погруженным в сосуд с водой (поставленный на специальную подставку) на чашке весов ($P_{\text{нас}}^{*}$).
4. Насыщенный образец извлечь и освободить от избытка воды. Взвесить насыщенный образец в воздухе ($P_{\text{нас}}$).
5. Результаты измерений занести в таблицу:

Параметр	*Результат измерения*
Вес сухого образца ($P_{\text{сух}}$), г	
Вес насыщенного образца в воздухе ($P_{\text{нас}}$), г	
Вес насыщенного образца в воде ($P_{\text{нас}}^{*}$), г	
Коэффициент открытой пористости ($k_{\text{по}}$), %	

6. Объем открытых пор находят делением веса воды в объеме пор на ее плотность:

$$V_{\text{по}} = \frac{P_{\text{нас}} - P_{\text{сух}}}{\delta_{\text{в}}}, \tag{3.6}$$

где $\delta_{\text{в}}$ – плотность воды, г/см^3; $(P_{\text{нас}} - P_{\text{сух}})$ – вес воды в порах, г.

7. Объем образца породы находят делением веса воды в объеме образца на плотность воды:

$$V = \frac{P_{\text{нас}} - P^*_{\text{нас}}}{\delta_{\text{в}}}, \tag{3.7}$$

где $(P_{\text{нас}} - P_{\text{нас}}{}^*)$ – вес жидкости в объеме образца, г.

8. Коэффициент открытой пористости находят следующим образом:

$$k_{\text{по}} = \frac{V_{\text{по}}}{V} = \frac{P_{\text{нас}} - P_{\text{сух}}}{P_{\text{нас}} - P^*_{\text{нас}}}. \tag{3.8}$$

Лабораторная работа № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВЯЗИ МЕЖДУ КОЭФФИЦИЕНТОМ ПОРИСТОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД И ИХ УДЕЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЕМ

При интерпретации данных электрического каротажа используют зависимость коэффициента пористости от удельного электрического сопротивления водонасыщенной породы. Связь удельного электрического сопротивления полностью водонасыщенной породы с удельным электрическим сопротивлением воды описывается уравнением

$$\rho_{вп} = P\rho_{в}, \tag{4.1}$$

где $\rho_{вп}$ – удельное электрическое сопротивление водонасыщенной породы; $\rho_{в}$ – удельное электрическое сопротивление воды, насыщающей породу; P – относительное электрическое сопротивление (параметр пористости).

$$P = \frac{\rho_{вп}}{\rho_{в}}. \tag{4.2}$$

Для чистой неглинистой породы P зависит только от структуры порового пространства и не зависит от минерализации воды в порах. Связь между параметром P и $k_{п}$ описывается эмпирическими соотношениями:

$$P = \frac{a}{k_{п}^{m}} \text{ (формула Дахнова);} \tag{4.3}$$

$$P = \frac{1}{k_{п}^{m}} \text{ (формула Арчи),} \tag{4.4}$$

где a и m – эмпирические коэффициенты, характеризующие структуру порового пространства и являющиеся постоянными для данного типа отложений.

Задание

По результатам исследования кернового материала получены данные о его пористости, а по данным электрокаротажа получены данные об удельном электрическом сопротивлении пород в разрезе скважины (табл. 4.1). Известно удельное электрическое сопротивление воды, насыщавшей породу – 3 Ом·м.

Таблица 4.1

Результаты электрокаротажа скважины и исследования керна из нее

Вариант ***1***			*Вариант* ***2***			*Вариант* ***3***			*Вариант* ***4***		
h, м	$\rho_{вп}$, Ом·м	$k_п$, отн. е.	h, м	$\rho_{вп}$, Ом·м	$k_п$, отн. е.	h, м	$\rho_{вп}$, Ом·м	$k_п$, отн. е.	h, м	$\rho_{вп}$, Ом·м	$k_п$, отн. е.
1120,0	16,06	0,22	1346,2	48,27	0,08	1392,3	7,05	0,35	1293,9	193,89	0,03
1120,5	24,29	0,14	1347,5	51,27	0,08	1393,3	48,63	0,07	1295,5	16,21	0,20
1121,8	20,45	0,16	1349,2	18,70	0,21	1394,8	10,39	0,38	1296,8	10,83	0,35
1122,5	24,29	0,14	1350,1	14,17	0,28	1395,6	40,97	0,09	1297,9	19,32	0,22
1123,7	23,29	0,14	1351,7	80,96	0,05	1396,7	8,39	0,38	1298,7	55,34	0,08
1124,7	17,25	0,18	1352,9	15,78	0,25	1398,2	11,59	0,37	1299,9	56,34	0,08
1126,0	11,41	0,27	1354,6	31,90	0,12	1398,9	16,09	0,24	1301,2	21,32	0,19
1126,9	18,25	0,18	1355,8	14,67	0,27	1400,2	12,57	0,33	1301,8	21,21	0,20
1128,4	9,75	0,35	1356,7	11,45	0,39	1401,3	41,43	0,08	1302,8	40,25	0,11
1129,7	13,34	0,25	1358,3	21,78	0,18	1403,0	12,07	0,26	1304,2	15,79	0,24
1130,6	9,02	0,34	1359,5	11,51	0,32	1404,2	13,07	0,26	1305,6	53,34	0,08
1131,5	21,45	0,16	1361,2	55,91	0,07	1405,5	11,57	0,33	1306,7	21,59	0,18
1132,9	19,25	0,18	1362,1	11,96	0,37	1407,1	28,47	0,12	1308,2	35,25	0,11
1133,6	10,99	0,28	1362,9	11,88	0,31	1408,5	13,67	0,23	1309,7	11,55	0,36
1135,1	16,49	0,20	1364,3	14,67	0,27	1409,6	13,01	0,21	1310,8	39,25	0,11
1136,0	10,60	0,29	1366,0	30,90	0,12	1411,0	6,82	0,36	1312,1	43,91	0,10
1137,2	12,99	0,28	1367,1	42,41	0,09	1411,9	20,03	0,16	1313,3	9,04	0,38
1138,5	15,74	0,21	1368,3	15,17	0,28	1413,1	11,39	0,38	1314,7	15,97	0,27
1139,4	15,74	0,21	1369,4	23,07	0,17	1414,5	9,21	0,28	1315,8	98,26	0,05
1140,7	16,49	0,20	1370,7	9,96	0,37	1416,1	98,18	0,04	1316,9	15,00	0,29
1141,4	10,60	0,29	1372,2	9,22	0,40	1417,4	11,57	0,33	1317,9	18,32	0,22
1142,5	20,28	0,17	1373,0	11,51	0,32	1418,4	8,82	0,36	1319,3	10,04	0,38
1143,3	17,49	0,20	1374,5	16,87	0,22	1419,7	11,07	0,26	1320,1	11,52	0,26
1144,3	10,02	0,34	1375,5	14,78	0,25	1420,6	15,67	0,23	1321,3	10,28	0,37
1145,3	11,24	0,30	1376,7	20,78	0,18	1421,4	11,05	0,35	1322,2	9,04	0,38
1146,5	14,74	0,21	1377,8	35,01	0,11	1422,8	10,39	0,38	1323,1	22,66	0,16
1147,3	10,29	0,33	1378,7	11,51	0,32	1423,7	10,57	0,33	1324,0	9,55	0,36
1148,7	13,86	0,24	1379,8	12,83	0,34	1425,3	11,07	0,26	1325,0	14,17	0,31
1150,0	19,45	0,16	1380,5	17,11	0,23	1426,6	8,57	0,33	1326,5	23,59	0,18
1151,2	18,25	0,18	1381,3	17,70	0,21	1428,0	9,59	0,37	1327,4	79,52	0,06

Продолжение табл. 4.1

Вариант ***5***			*Вариант* ***6***			*Вариант* ***7***			*Вариант* ***8***		
h, м	$\rho_{вп}$, Ом·м	$k_п$, отн.е д.	h, м	$\rho_{вп}$, Ом·м	$k_п$, отн. ед.	h, м	$\rho_{вп}$, Ом·м	$k_п$, отн. ед.	h, м	$\rho_{вп}$, Ом·м	$k_п$, отн. ед.
1186,1	68,66	0,08	1674,8	31,53	0,17	1347,0	39,77	0,10	1674,2	393,90	0,03
1187,6	277,06	0,03	1675,8	35,53	0,17	1347,9	66,25	0,06	1676,0	141,08	0,06
1188,7	32,37	0,14	1677,1	12,09	0,34	1349,0	36,01	0,11	1677,9	24,26	0,27
1190,5	14,70	0,35	1678,1	43,18	0,14	1350,4	11,22	0,40	1678,9	16,59	0,31
1191,4	21,45	0,19	1679,8	74,07	0,09	1351,6	42,41	0,09	1680,6	38,25	0,16
1193,1	17,32	0,29	1681,5	25,01	0,24	1353,0	45,41	0,09	1681,9	40,43	0,15
1194,3	12,70	0,35	1683,3	18,13	0,23	1354,5	14,67	0,27	1683,4	20,78	0,21
1195,6	13,79	0,30	1684,4	24,26	0,27	1356,2	16,78	0,25	1684,3	71,25	0,10
1196,6	40,92	0,12	1686,2	27,19	0,18	1357,4	44,41	0,09	1685,6	51,11	0,12
1198,3	14,32	0,29	1687,3	31,15	0,19	1359,0	37,01	0,11	1686,8	27,01	0,24
1200,0	19,04	0,20	1688,9	74,07	0,09	1360,1	13,51	0,32	1687,9	260,00	0,04
1200,8	87,77	0,07	1690,3	711,11	0,02	1361,6	18,70	0,21	1689,6	21,05	0,32
1202,6	29,02	0,16	1691,3	708,11	0,02	1362,5	11,70	0,38	1691,1	19,26	0,27
1203,5	133,58	0,05	1692,9	15,59	0,31	1363,5	14,42	0,24	1692,6	13,09	0,34
1204,9	21,45	0,19	1694,1	56,82	0,11	1365,1	21,07	0,17	1693,6	256,00	0,04
1206,2	183,19	0,04	1695,8	68,25	0,10	1366,2	82,96	0,05	1694,5	82,07	0,09
1207,6	8,36	0,36	1697,1	14,50	0,28	1367,7	17,87	0,22	1695,5	20,26	0,27
1208,6	15,32	0,29	1698,1	23,36	0,20	1369,1	30,90	0,12	1696,8	13,26	0,36
1209,7	82,77	0,07	1699,5	21,05	0,32	1370,3	9,96	0,37	1697,9	54,11	0,12
1210,9	11,06	0,34	1700,8	32,36	0,20	1371,7	16,11	0,23	1698,9	716,11	0,02
1212,5	20,04	0,20	1702,5	31,15	0,19	1373,3	31,30	0,13	1699,9	24,15	0,19
1214,0	25,45	0,19	1703,9	389,90	0,03	1374,8	16,87	0,22	1701,4	43,67	0,13
1215,5	46,96	0,11	1705,5	56,11	0,12	1376,3	10,23	0,36	1702,5	138,08	0,06
1216,7	186,19	0,04	1706,7	92,39	0,08	1377,0	17,70	0,21	1703,7	18,26	0,27
1218,3	182,19	0,04	1708,3	19,38	0,22	1377,9	11,52	0,35	1705,2	26,19	0,18
1220,0	31,48	0,15	1709,7	34,15	0,19	1379,6	10,96	0,37	1706,3	38,18	0,14
1221,4	107,71	0,06	1711,6	28,36	0,20	1380,8	32,90	0,12	1707,2	22,78	0,21
1223,1	11,79	0,30	1712,6	257,00	0,04	1381,8	68,25	0,06	1708,8	51,67	0,13
1224,9	27,90	0,17	1714,1	18,09	0,26	1382,6	24,07	0,17	1709,8	26,78	0,21
1226,0	18,18	0,26	1715,8	390,90	0,03	1384,3	18,11	0,23	1711,6	179,89	0,05

Окончание табл. 4.1

Вариант ***9***			*Вариант* ***10***			*Вариант* ***11***			*Вариант* ***12***		
h, м	$\rho_{вп}$, Ом·м	$k_п$, отн. ед.	h, м	$\rho_{вп}$, Ом·м	$k_п$, отн. ед.	h, м	$\rho_{вп}$, Ом·м	$k_п$, отн. ед.	h, м	$\rho_{вп}$, Ом·м	$k_п$, отн. ед.
1120,4	17,32	0,19	1346,6	13,51	0,32	1392,7	75,82	0,05	1293,5	8,04	0,38
1121,5	12,41	0,27	1348,0	22,78	0,18	1393,4	23,14	0,13	1294,6	28,37	0,13
1122,6	12,85	0,26	1349,4	16,70	0,21	1394,4	10,62	0,27	1295,6	12,45	0,33
1123,2	27,08	0,12	1350,5	51,27	0,08	1395,5	13,15	0,31	1297,0	58,34	0,08
1124,1	12,85	0,26	1351,6	12,71	0,29	1397,0	15,09	0,24	1298,4	8,45	0,33
1125,1	18,28	0,17	1352,9	44,41	0,09	1397,8	15,66	0,18	1299,3	9,17	0,31
1126,1	20,28	0,17	1354,4	10,52	0,35	1399,2	8,15	0,31	1299,9	12,97	0,27
1127,4	15,74	0,21	1355,4	14,71	0,29	1400,6	98,18	0,04	1300,7	15,79	0,24
1128,4	13,41	0,27	1356,3	13,20	0,26	1402,2	36,70	0,10	1302,2	98,26	0,05
1129,5	10,24	0,30	1358,0	15,78	0,25	1403,3	8,82	0,36	1303,7	135,33	0,04
1130,1	19,28	0,17	1359,0	15,42	0,24	1404,7	9,57	0,33	1305,0	13,45	0,33
1131,3	10,24	0,30	1360,0	16,87	0,22	1405,4	12,67	0,23	1306,3	27,56	0,15
1132,6	13,43	0,23	1361,2	14,78	0,25	1406,5	13,01	0,21	1307,7	80,52	0,06
1134,1	12,60	0,29	1361,9	17,70	0,21	1408,2	13,48	0,30	1309,0	16,32	0,22
1135,1	21,77	0,15	1363,1	8,22	0,40	1409,8	26,17	0,14	1310,2	7,83	0,35
1136,3	18,28	0,17	1364,7	10,23	0,36	1411,4	12,56	0,25	1311,1	14,52	0,26
1137,7	9,59	0,32	1365,7	12,83	0,34	1412,2	36,97	0,09	1312,0	13,97	0,27
1138,7	19,25	0,18	1367,3	10,52	0,35	1413,2	38,97	0,09	1313,5	8,80	0,32
1139,4	9,75	0,35	1368,6	11,22	0,40	1413,9	25,47	0,12	1315,1	81,52	0,06
1140,7	22,77	0,15	1370,2	16,78	0,25	1415,1	11,59	0,37	1316,5	39,25	0,11
1141,3	17,25	0,18	1371,1	21,78	0,18	1416,2	23,03	0,16	1317,9	42,91	0,10
1142,8	14,43	0,23	1372,1	36,01	0,11	1417,5	17,67	0,19	1319,1	27,77	0,14
1144,3	10,60	0,29	1373,4	50,27	0,08	1418,8	15,31	0,22	1320,3	10,80	0,32
1145,7	17,32	0,19	1374,2	9,23	0,36	1420,0	72,82	0,05	1320,9	36,48	0,12
1146,8	24,04	0,13	1375,8	21,64	0,19	1421,3	74,82	0,05	1322,3	36,25	0,11
1148,2	12,34	0,25	1377,4	10,70	0,38	1423,0	40,97	0,09	1323,8	43,91	0,10
1149,4	21,45	0,16	1378,4	12,71	0,29	1424,4	53,63	0,07	1324,7	53,34	0,08
1150,3	20,28	0,17	1379,2	16,78	0,25	1425,5	12,05	0,35	1326,2	54,34	0,08
1150,9	8,75	0,35	1380,0	12,67	0,27	1426,8	31,27	0,11	1326,9	19,59	0,18
1151,9	9,02	0,34	1381,7	80,96	0,05	1428,5	10,59	0,37	1328,2	10,80	0,32

1. С помощью регрессионного анализа, установить зависимость коэффициента пористости от удельного электрического сопротивления породы. Использовать формулу Арчи, из которой следует, что

$$k_{\text{п}} = \sqrt[m]{\rho_{\text{в}} / \rho_{\text{вп}}} .$$

2. Результаты представить в виде графика, как показано на рис. 4.1.

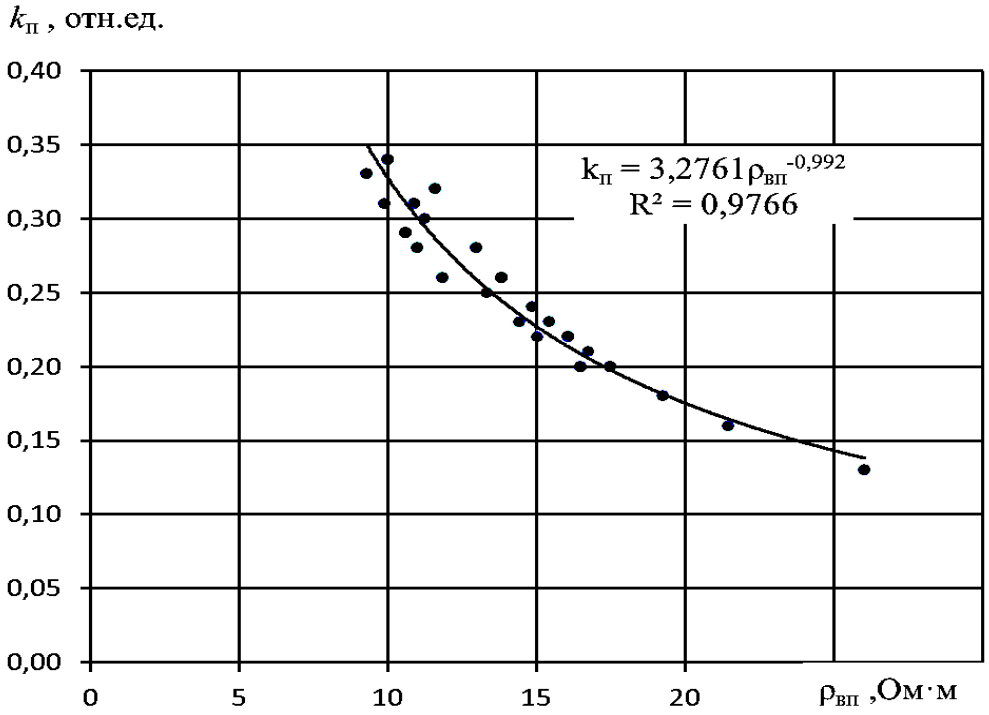


Рис. 4.1. Зависимость коэффициента пористости от удельного электрического сопротивления породы

Лабораторная работа № 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВЯЗИ МЕЖДУ КОЭФФИЦИЕНТОМ ПОРИСТОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД И СКОРОСТЬЮ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Для литологического расчленения разреза скважин и определения коэффициента пористости в комплексе геофизических методов используется акустический метод. Пористость определяют по интервальному времени пробега продольной волны Δt. При интерпретации данных акустического каротажа (АК) применяют зависимость

$$k_{\text{п}} = f(\Delta t), \qquad (5.1)$$

полученную в лабораторных условиях на образцах керна.

Значение Δt возрастает при прочих равных условиях с увеличением пористости породы.

Для терригенных коллекторов зависимость $\Delta t = f(k_{\text{п}})$ наиболее часто описывается уравнением вида $k_{\text{п}} = a \cdot \Delta t + b$ (рис. 5.1).

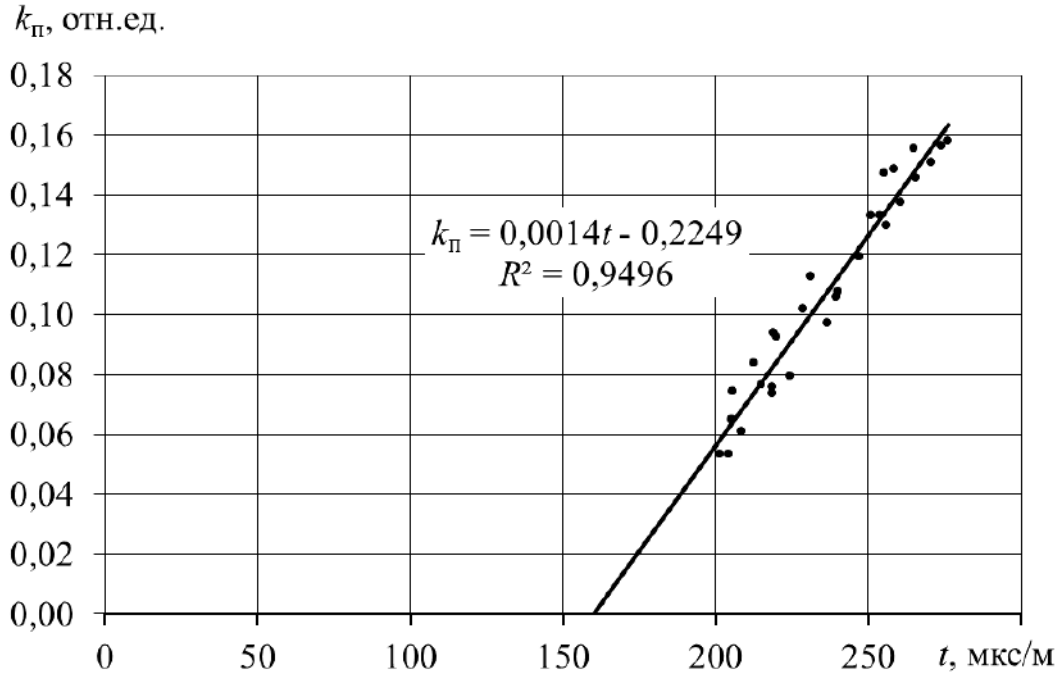


Рис. 5.1. Зависимость коэффициента пористости от интервального времени пробега продольной волны

Положение графика зависимости по отношению к осям координат определяется различными факторами:

— минеральным скелетом породы;
— характером и типом насыщающего флюида;
— степенью сцементированности зерен и типом цемента;

— присутствием глинистого материала;
— акустическим контактом между зернами;
— термобарическими условиями.

При $k_{\text{п}} = 0$ $\Delta t = \Delta t_{\text{ск}}$, которое определяется минеральным составом скелета породы. Но даже для мономинеральной однородной породы при нормальных атмосферных условиях $\Delta t_{\text{ск}}$ может изменяться в зависимости от состояния поверхности зерен и акустического контакта между ними.

Практическое исследование зависимости $\Delta t = f(k_{\text{п}})$ в большинстве случаев позволяет качественно и с минимальными ошибками проводить интерпретацию данных акустического каротажа.

Задание

По результатам исследования кернового материала получены данные о его пористости, а по данным акустического каротажа получены данные об интервальном времени пробега продольной волны в породах разреза скважины (табл. 5.1).

1. Используя регрессионный анализ, установить зависимость коэффициента пористости от интервального времени пробега продольной волны в породах.

2. Результаты представить в виде графика, приведенного на рис. 5.1.

3. Определить интервальное время, соответствующее скелету породы $\Delta t = \Delta t_{\text{ск}}$.

Таблица 5.1

Результаты акустического каротажа скважины и исследования керна из нее

Номер п/п	*Вариант* ***1***		*Вариант* ***2***		*Вариант* ***3***		*Вариант* ***4***	
	Δt, мкс/м	$k_п$, отн. ед.	Δt, мкс/м	$k_п$, отн. ед.	Δt, мкс/м	$k_п$, отн. ед.	Δt, мкс/м	$k_п$, отн. ед.
1	231	0,099	213	0,080	250	0,164	237	0,140
2	205	0,063	219	0,097	277	0,209	241	0,148
3	272	0,173	272	0,172	290	0,248	231	0,138
4	270	0,170	205	0,073	273	0,203	221	0,118
5	255	0,139	219	0,089	278	0,219	234	0,145
6	202	0,048	273	0,176	260	0,183	226	0,118
7	277	0,175	226	0,095	238	0,143	254	0,179
8	229	0,099	219	0,097	265	0,201	231	0,133
9	228	0,096	221	0,086	277	0,226	211	0,103
10	248	0,126	207	0,083	251	0,176	214	0,110
11	220	0,075	249	0,146	273	0,213	236	0,147
12	270	0,170	258	0,161	288	0,231	272	0,190
13	221	0,076	262	0,153	230	0,133	239	0,137
14	273	0,161	213	0,074	283	0,229	210	0,089
15	218	0,071	232	0,114	288	0,225	205	0,072
16	210	0,080	235	0,111	215	0,098	257	0,171
17	252	0,126	275	0,179	235	0,147	279	0,214
18	211	0,083	231	0,104	245	0,154	252	0,163
19	220	0,096	207	0,079	258	0,175	255	0,157
20	204	0,063	223	0,101	212	0,095	233	0,123
21	227	0,097	204	0,061	238	0,147	244	0,142
22	216	0,074	243	0,132	277	0,210	237	0,137
23	206	0,071	242	0,127	228	0,126	209	0,096
24	264	0,144	275	0,183	272	0,209	223	0,121
25	222	0,091	223	0,104	246	0,174	208	0,084
26	238	0,100	257	0,149	221	0,118	219	0,119
27	202	0,061	269	0,175	217	0,104	263	0,186
28	277	0,169	212	0,088	247	0,173	215	0,098
29	262	0,143	201	0,053	214	0,114	236	0,129
30	221	0,090	243	0,121	279	0,209	244	0,159

Продолжение табл. 5.1

Номер п/п	*Вариант* ***5***		*Вариант* ***6***		*Вариант* ***7***		*Вариант* ***8***	
	Δt, мкс/м	$k_п$, отн. ед.	Δt, мкс/м	$k_п$, отн. ед.	Δt, мкс/м	$k_п$, отн. ед.	Δt, мкс/м	$k_п$, отн. ед.
1	232	0,083	265	0,154	278	0,270	285	0,327
2	263	0,113	217	0,069	304	0,313	292	0,348
3	267	0,125	254	0,144	296	0,303	227	0,223
4	280	0,131	205	0,062	305	0,331	239	0,238
5	244	0,088	181	0,021	217	0,164	229	0,224
6	244	0,092	213	0,065	276	0,277	275	0,312
7	252	0,094	240	0,105	243	0,222	286	0,333
8	227	0,071	228	0,103	289	0,296	213	0,189
9	205	0,036	244	0,128	275	0,274	273	0,324
10	204	0,032	235	0,095	293	0,300	234	0,216
11	235	0,072	278	0,173	286	0,279	234	0,243
12	274	0,121	237	0,102	250	0,231	257	0,261
13	211	0,045	251	0,130	293	0,296	261	0,275
14	250	0,093	199	0,054	226	0,194	300	0,358
15	249	0,105	271	0,164	254	0,230	273	0,301
16	237	0,086	252	0,134	231	0,178	265	0,290
17	226	0,068	195	0,052	310	0,339	251	0,258
18	241	0,087	277	0,171	275	0,267	235	0,246
19	280	0,146	186	0,040	298	0,313	285	0,333
20	240	0,076	200	0,052	269	0,248	288	0,322
21	204	0,030	229	0,098	279	0,277	291	0,325
22	256	0,109	277	0,175	266	0,252	284	0,319
23	241	0,082	251	0,130	248	0,229	230	0,229
24	238	0,079	279	0,166	240	0,217	235	0,226
25	224	0,064	196	0,039	241	0,219	247	0,253
26	267	0,122	193	0,049	275	0,266	310	0,392
27	200	0,038	257	0,137	239	0,207	213	0,177
28	205	0,040	205	0,073	267	0,246	287	0,335
29	271	0,129	194	0,040	307	0,325	216	0,199
30	243	0,091	260	0,138	251	0,238	280	0,305

Окончание табл.5.1

Номер п/п	*Вариант* ***9***		*Вариант* ***10***		*Вариант* ***11***		*Вариант* ***12***	
	Δt, мкс/м	$k_п$, отн. ед.	Δt, мкс/м	$k_п$, отн. ед.	Δt, мкс/м	$k_п$, отн. ед.	Δt, мкс/м	$k_п$, отн. ед.
1	262	0,150	260	0,152	284	0,217	244	0,161
2	264	0,143	248	0,136	269	0,197	273	0,198
3	265	0,155	276	0,176	221	0,123	208	0,082
4	237	0,110	213	0,076	285	0,228	207	0,082
5	238	0,115	215	0,084	277	0,207	255	0,178
6	267	0,159	229	0,117	233	0,147	277	0,199
7	233	0,107	232	0,104	232	0,134	265	0,194
8	217	0,077	265	0,168	230	0,129	225	0,118
9	248	0,133	237	0,127	267	0,198	209	0,083
10	278	0,178	206	0,065	232	0,132	246	0,143
11	222	0,086	240	0,122	226	0,126	278	0,212
12	221	0,077	278	0,178	248	0,172	235	0,131
13	243	0,117	253	0,156	271	0,204	280	0,218
14	251	0,126	222	0,102	244	0,155	235	0,143
15	267	0,161	265	0,169	246	0,172	261	0,168
16	231	0,103	261	0,150	251	0,165	224	0,122
17	225	0,101	266	0,167	218	0,121	276	0,214
18	267	0,150	239	0,124	289	0,246	276	0,191
19	255	0,125	266	0,175	281	0,223	225	0,115
20	234	0,099	258	0,145	225	0,130	264	0,193
21	210	0,073	250	0,151	223	0,116	252	0,154
22	225	0,083	205	0,071	257	0,189	275	0,192
23	249	0,137	225	0,106	248	0,160	244	0,147
24	250	0,126	262	0,169	281	0,214	270	0,189
25	244	0,118	258	0,163	273	0,201	248	0,155
26	272	0,157	239	0,130	265	0,203	271	0,198
27	200	0,053	268	0,170	232	0,131	277	0,196
28	210	0,066	231	0,109	253	0,165	234	0,135
29	210	0,062	248	0,144	245	0,173	247	0,159
30	262	0,150	258	0,158	277	0,222	277	0,207

Лабораторная работа № 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД ПО КРИВОЙ КАПИЛЛЯРНОГО ДАВЛЕНИЯ

Относительную проницаемость образцов пород обычно рассчитывают по кривым капиллярного давления, полученным при лабораторном анализе керна. Кривые капиллярного давления строятся на основании опытных данных: насыщенности образцов пород жидкостью и давления вытеснения жидкости из поровой системы.

Проницаемость рассчитывают по характеристикам пор породы:

$$k = 0{,}05(\sigma\cos\theta)^2 k_{\text{п}} L \int_{x=0}^{x=1} \frac{dx}{P_{\text{к}}^2}, \qquad (6.1)$$

где k – проницаемость; σ – поверхностное натяжение; θ – угол смачивания; $k_{\text{п}}$ – пористость; L – литологический коэффициент (относительная извилистость поровых каналов), в среднем равный 0,216; x – доля общего объема пустот системы, занятая жидкостью, содержащейся в керне или вытесняемой из него; $P_{\text{к}}$ – капиллярное давление.

Эффективная проницаемость для смачивающей фазы будет определяться как

$$k_{\text{эс}} = 0{,}05(\sigma\cos\theta)^2 k_{\text{п}} L \int_{x=0}^{x=x_{\text{с}}} \frac{dx}{P_{\text{к}}^2}. \qquad (6.2)$$

Данный интеграл отличается от предыдущего пределами интегрирования.

И, наконец, относительная проницаемость смачивающей фазы (воды) будет

$$k_{\text{ос}} = \frac{k_{\text{эс}}}{k} = \int_{x=0}^{x=x_{\text{с}}} \frac{dx}{P_{\text{к}}^2} \Bigg/ \int_{x=0}^{x=1} \frac{dx}{P_{\text{к}}^2}, \qquad (6.3)$$

а относительная проницаемость несмачивающей фазы (нефти) будет

$$k_{\text{ос}} = \frac{k_{\text{эс}}}{k} = \int_{x=x_{\text{с}}}^{x=1} \frac{dx}{P_{\text{к}}^2} \Bigg/ \int_{x=0}^{x=1} \frac{dx}{P_{\text{к}}^2}. \qquad (6.4)$$

Для использования формулы расчета относительной проницаемости необходимо знать характер кривой капиллярного давления, по которой оба интеграла могут быть определены ***графически***.

Методика расчета относительной проницаемости по кривым капиллярного давления сводится к следующему:

1. Экспериментально определенные кривые капиллярного давления $P_к = f(x)$ перестраиваются графически в функцию $1/P_к^2=f(x)$ (рис. 6.1).

2. Для выбранных значений x рассчитывают значения интегралов в формулах (6.3) и (6.4). Значения искомых интегралов соответствуют площади под кривой $1/P_к^2=f(x)$ для заданных пределов интегрирования.

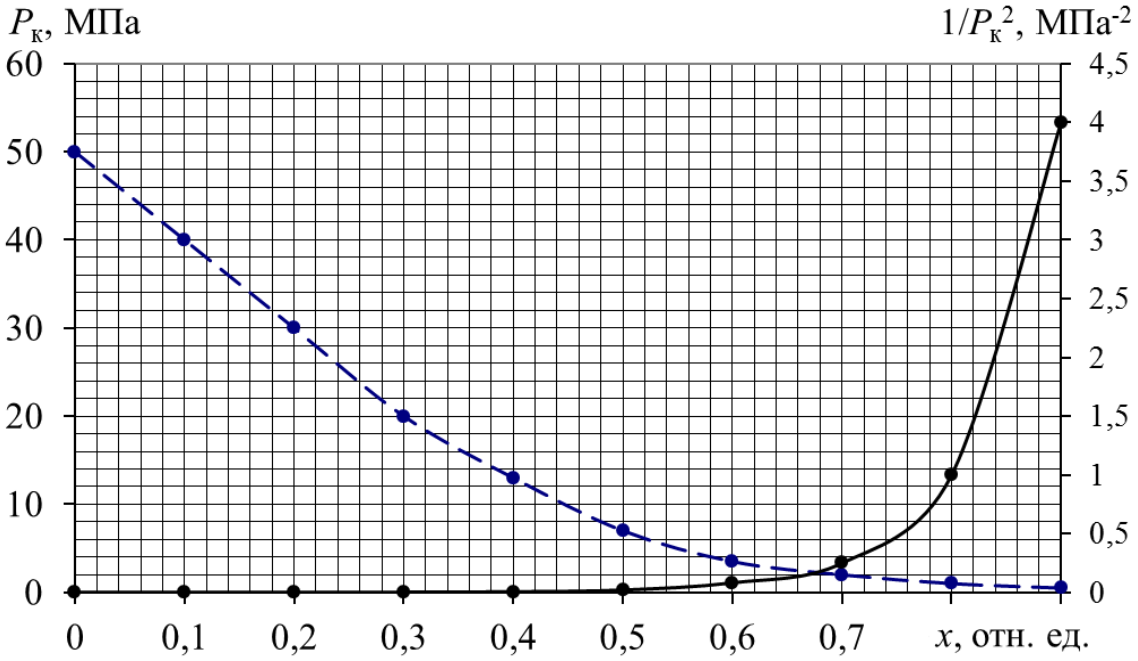


Рис. 6.1. Пример расчета функции $1/P_к^2=f(x)$ (сплошная линия) по кривой капиллярного давления $P_к=f(x)$ (пунктирная линия)

Задание

По результатам лабораторных исследований кернового материала получены кривые капиллярного давления – зависимость насыщенности порового пространства породы жидкостью от давления вытеснения жидкости из пор (табл. 6.1).

1. Используя приложение *Exel*, для своего варианта построить кривую капиллярного давления $P_к=f(x)$, как показано на рис. 6.1.

2. Из значений $P_к$ получить значения $1/P_к^2$ и построить график $1/P_к^2=f(x)$ по вспомогательной оси, как показано на рис. 6.1.

3. Найти графически значения интегралов в формулах (6.3) и (6.4) как площади фигур, приняв границу между смачивающей (водой) и несмачивающей (нефтью) фазами $x_с$=0,7. Площади фигур можно найти, подсчитав количество клеток внутри фигур.

Таблица 6.1

Результаты измерения капиллярного давления

x, отн.ед.	$P_к$, МПа											
	1	***2***	***3***	***4***	***5***	***6***	***7***	***8***	***9***	***10***	***11***	***12***
0	50	70	80	40	60	30	90	70	90	45	80	35
0,1	40	50	50	30	40	20	60	44,6	50	30	48	22
0,2	30	30	30	20	25	12	40	25,4	27	15	30	14
0,3	20	15	15	12	15	7	25	13,8	15	9	18	9
0,4	13	9	9	6	10	4	14	6,4	9	5	11	5,5
0,5	7	6	5	3	6	2	7	3,1	5	3	7	3
0,6	3,5	3,5	2,5	1,5	3,5	1	3,5	1,8	2,5	1,5	4	1,5
0,7	2	2	1	0,5	2	0,5	2	1,6	1	0,5	2	0,5
0,8	1	1	0,5	0,4	1	0,4	1	1,2	0,5	0,4	1	0,4
0,9	0,5	0,5	0,3	0,2	0,5	0,3	0,5	0,7	0,3	0,3	0,5	0,3
1	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,1	0,2	0,2	0,2

4. Вычислить относительную проницаемость смачивающей фазы (воды) и несмачивающей фазы (нефти) по формулам (6.3) и (6.4).

Лабораторная работа № 7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ СВОБОДНОЙ, ФИЗИЧЕСКИ И ХИМИЧЕСКИ СВЯЗАННОЙ ВОДЫ ПО ДАННЫМ ТЕРМОГРАВИТОГРАММЫ

В поровом пространстве породы кроме свободной (гравитационной) воды может присутствовать также физически связанная вода. Химически связанная вода находится в кристаллической решетке минералов твердой фазы.

Химически связанная вода присутствует в минералах горных пород в виде молекул H_2O, входящих в кристаллы (кристаллизационная вода), или в виде ионов OH^-, H^+, H_3O^+ кристаллической решетки минералов (конституционная вода).

Примером минералов с кристаллизационной водой является гипс, а также др. минералы гидрохимического происхождения – апсомит, гидроборацит, боронатрокальцит, диоптаз. Большинство минералов с кристаллизационной водой теряют ее при прокаливании до 200 – 600 °С.

Конституционную воду содержат все глинистые минералы и большое число минералов алюмосиликатного состава, не относящихся к глинистым минералам. Примеры минералов с конституционной водой – каолинит, пирофиллит, хлорит, мусковит, глауконит, биотит. Конституционная вода большинства минералов выделяется прокаливанием при температуре 400 – 1000 °С.

К ***физически связанной воде*** относят ту часть воды в поровом пространстве породы, которая остается в нем благодаря взаимодействию молекул воды с поверхностью минерального скелета породы, а также в результате влияния капиллярных сил.

Физически связанную воду можно удалить полностью путем высушивания образца с нагревом (105 – 160 °С) или в изотермическом режиме, экстрагированием образца в сокслете, частично – центрифугированием, капиллярным вытеснением или капиллярным впитыванием.

Содержание свободной, физически и химически связанной воды определяют при термическом анализе по диаграмме потери массы при прокаливании – термогравитограмме (ТГ), которая содержит кривые изменения массы m дозы изучаемого вещества и температуры Т. Интерпретацию ТГ проводят с учетом характерных для каждо-

го минерала аномалий на кривых m и T, отражающих выделение химически связанной воды (рис. 7.1).

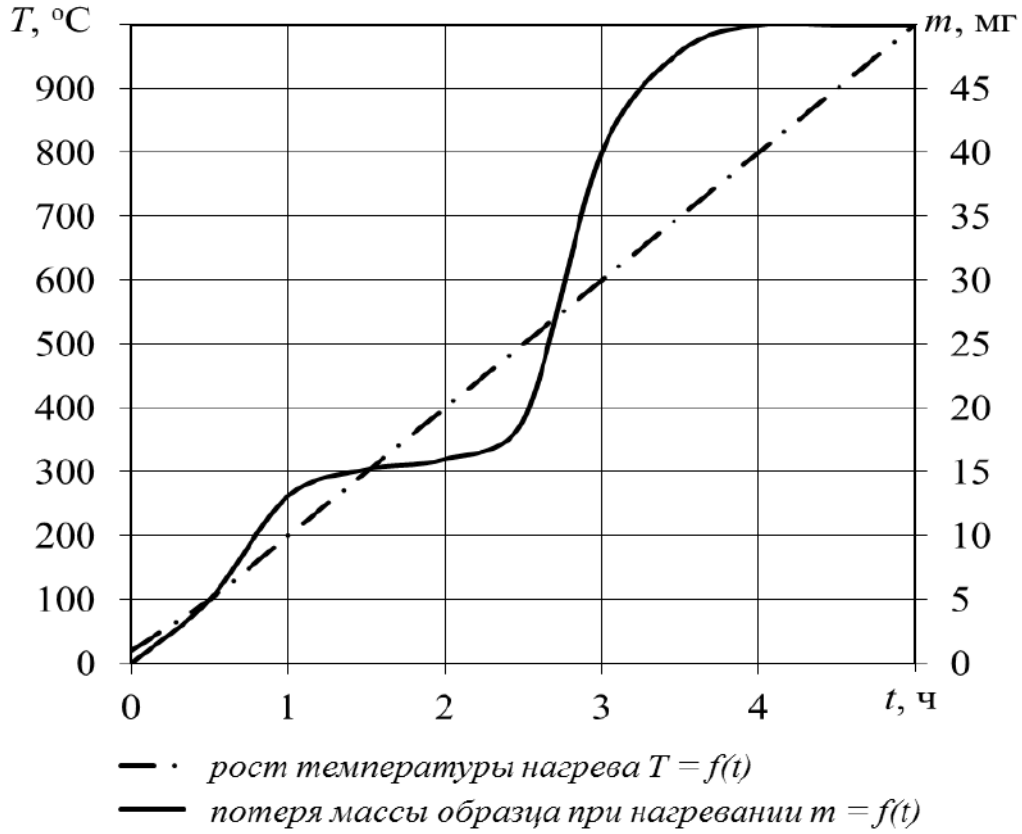


Рис. 7.1. Пример термогравитограммы для каолинита

Задание

По результатам лабораторных исследований кернового материала получены термогравитограммы (табл. 7.1).

1. Построить термогравитограмму, согласно указанному варианту.

2. По термогравитограмме определить:

а) общее количество воды m, выделившейся при нагревании образца;

б) количество свободной и физически связанной воды $m_{с+ф}$, выделившейся из образца при нагревании;

в) количество химически связанной воды $m_х$, выделившейся из образца при нагревании.

3. Рассчитать содержание свободной и физически связанной воды:

$$Q_{с+ф} = (m_{с+ф}/m)\ 100\ \%\ . \qquad (7.1)$$

4. Рассчитать содержание химически связанной воды:

$$Q_х = (m_х/m)\ 100\ \%\ . \qquad (7.2)$$

Таблица 7.1

Результаты термогравитометрии

		Вариант											
		1	***2***	***3***	***4***	***5***	***6***	***7***	***8***	***9***	***10***	***11***	***12***
t, ч	*T*, °C	*m*, г	*m*, г	*m*, г	*m*, г	*m*, г	*m*, г	*m*, г	*m*, г	*m*, г	*m*, г	*m*, г	*m*, г
0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,5	100	5	5	5	5	5	5,5	5,5	7,5	7,0	6,5	6,5	8,0
1	200	13,1	9	7,5	10,2	10,2	14	14	19,7	12,6	9,8	13,3	16,3
1,5	300	15,2	9	7,5	12	12	14	17	22,8	12,6	9,8	15,6	19,2
2	400	16	9	7,5	12	12	14	17	24	12,6	9,8	15,6	19,2
2,5	500	19	10,5	15,1	12	12	14	17	28,5	14,7	19,6	15,6	19,2
3	600	40	28,8	23,3	20,9	21	20,9	24,2	60	40,3	30,3	27,2	33,4
3,5	700	47,9	41,8	30	32,6	37,8	37,8	47,5	71,9	58,5	39,0	42,4	60,5
4	800	50	45	35	40	50	60	70	75	63,0	45,5	52,0	80,0
4,5	900	50	45	35	40	50	60	70	75	63,0	45,5	52,0	80,0
5	1000	50	45	35	40	50	60	70	75	63,0	45,5	52,0	80,0

Лабораторная работа № 8

ИЗУЧЕНИЕ НЕОБРАТИМОГО УПЛОТНЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Давление и температура возрастают по мере увеличения глубины залегания пластов. В связи с этим влияние термодинамических условий на физические свойства пород-коллекторов приобретает важное значение. Если раньше эти факторы учитывались не всегда, то с развитием глубокого бурения прогнозирование свойств коллекторов стало необходимостью.

На больших глубинах породы испытывают воздействие высоких давлений и температур, в результате чего породы деформируются и изменяют свои физические свойства. Изменение ***пористости*** и ***проницаемости*** песчаников под действием давления определяется деформациями, которые изменяют объем порового пространства. Величина деформации зависит от состава и текстурно-структурных свойств породы.

Воздействие динамически напряженных зон, деформация осадочных пород оказывают влияние на фильтрационно-емкостные свойства коллекторов, параметры гидроразрыва пласта, обводненность добываемой продукции, осложнения и аварии при бурении и эксплуатации скважин (разрушение обсадных колонн).

Эффект необратимого уплотнения вмещающих пород необходимо учитывать и при проектировании разработки месторождений нефти и газа с целью выбора оптимального режима.

Деформацию и изменение физических свойств горных пород в общем случае рассматривают в зависимости от эффективного напряжения (давления):

$$P_{эф} = P - P_{пл}, \qquad (8.1)$$

где P – среднее нормальное давление (горное давление в данной точке земной коры); $P_{пл}$ – пластовое (поровое) давление.

При изменении эффективного давления происходит объемная деформация скелета породы, несущего на себе нагрузку вышележащей толщи. Под действием изменившегося пластового давления дополнительно возникает деформация минералов, слагающих скелет породы, а при изменении температуры интенсивнее происходят вторичные процессы, изменяются механические свойства минералов и происходит их тепловое расширение (или сжатие).

Для определения среднего нормального давления в каком-то элементарном объеме пласта необходимо знать три главных нор-

мальных давления в этом объеме – P_x, P_y, P_z. Тогда

$$P = \frac{1}{3}(P_x + P_y + P_z). \quad (8.2)$$

В осадочных пористых породах, подвергавшихся механическим напряжениям в течение длительного геологического времени, на больших глубинах необратимые деформации подобны пластическим, при которых все главные нормальные напряжения равны между собой:

$$P = P_z = g\sum_{i=1}^{n} h_i \delta_{\text{п}i}, \quad (8.3)$$

где h_i – мощность i-го литологически однородного интервала; $\delta_{\text{п}i}$ – плотность пород i-го литологически однородного интервала.

Нормальное пластовое давление

$$P_{\text{пл}} = g\sum_{i=1}^{n} h_i \delta_{\text{в}i}, \quad (8.4)$$

где $\delta_{\text{в}i}$ – плотность пластовой воды в интервале h_i.

Для среды, состоящей из горизонтально залегающих бесконечных пластов, эффективное давление будет

$$P_{\text{эф}} = P - P_{\text{пл}} = g\sum_{i=1}^{n} h_i(\delta_{\text{п}i} - \delta_{\text{в}i}). \quad (8.5)$$

Если воспользоваться средними значениями плотностей пород и воды в данном разрезе, то

$$P_{\text{эф}} = P - P_{\text{пл}} = gh(\delta_{\text{п.ср}} - \delta_{\text{в.ср}}). \quad (8.6)$$

Если уравнение $k_{\text{п}} = V_{\text{п}} / V$ продифференцировать, то получим выражение для определения необратимого изменения коэффициента пористости с глубиной

$$\frac{dk_{\text{п}}}{k_{\text{п}}} = \frac{dV_{\text{п}}}{V_{\text{п}}} - \frac{dV}{V}. \quad (8.7)$$

Плотность породообразующих минералов мало изменяется с глубиной. Следовательно, изменение объема породы происходит главным образом за счет уменьшения порового пространства породы. Поэтому $dV \approx dV_n$. Тогда

$$\frac{dk_{\text{п}}}{(1-k_{\text{п}})k_{\text{п}}} \approx \frac{dV_{\text{п}}}{V_{\text{п}}}. \quad (8.8)$$

Необратимые деформации осадочных горных пород оценивают через *коэффициент необратимого уплотнения* породы $\beta_{\text{п}}(t, T)$

(В. М. Добрынин), который зависит от времени уплотнения осадка t и его температуры T:

$$\beta_{\text{п}}(t,\ T) = -\frac{1}{V_{\text{п}}}\frac{dV_{\text{п}}}{d(P - P_{\text{пл}})} = -\frac{1}{V_{\text{п}}}\frac{dV_{\text{п}}}{g(\delta_{\text{п.ср}} - \delta_{\text{в.ср}})\,dh}. \qquad (8.9)$$

Подставив это выражение в предыдущее, получим дифференциальное уравнение для определения закономерности уплотнения осадочных пород:

$$\frac{dk_{\text{п}}}{(1 - k_{\text{п}})k_{\text{п}}} \approx -\beta_{\text{п}}(t,T)\,g(\delta_{\text{п.ср}} - \delta_{\text{в.ср}})\,dh. \qquad (8.10)$$

Интегрирование этого уравнения позволяет получить выражение для описания изменения пористости осадочных пород с глубиной:

$$k_{\text{п}}(h) = \frac{k_{\text{п}}(0)\exp\left\{-\beta_{\text{п}}(t,T)\,g(\delta_{\text{п.ср}} - \delta_{\text{в.ср}})\,h\right\}}{1 - k_{\text{п}}(0)\left[1 - \exp\left\{-\beta_{\text{п}}(t,T)\,g(\delta_{\text{п.ср}} - \delta_{\text{в.ср}})\,h\right\}\right]}, \qquad (8.11)$$

где $k_{\text{п}}(h)$ – пористость на глубине h; $k_{\text{п}}(0)$ – пористость пород на поверхности.

Коэффициенты необратимого уплотнения зависят от типа пород. Наибольшие их значения отмечаются у глинистых пород и мергелей, наименьшие – у кварцевых песчаников и уплотненных известняков. Изменение пористости осадочных пород с глубиной показано на рис. 8.1.

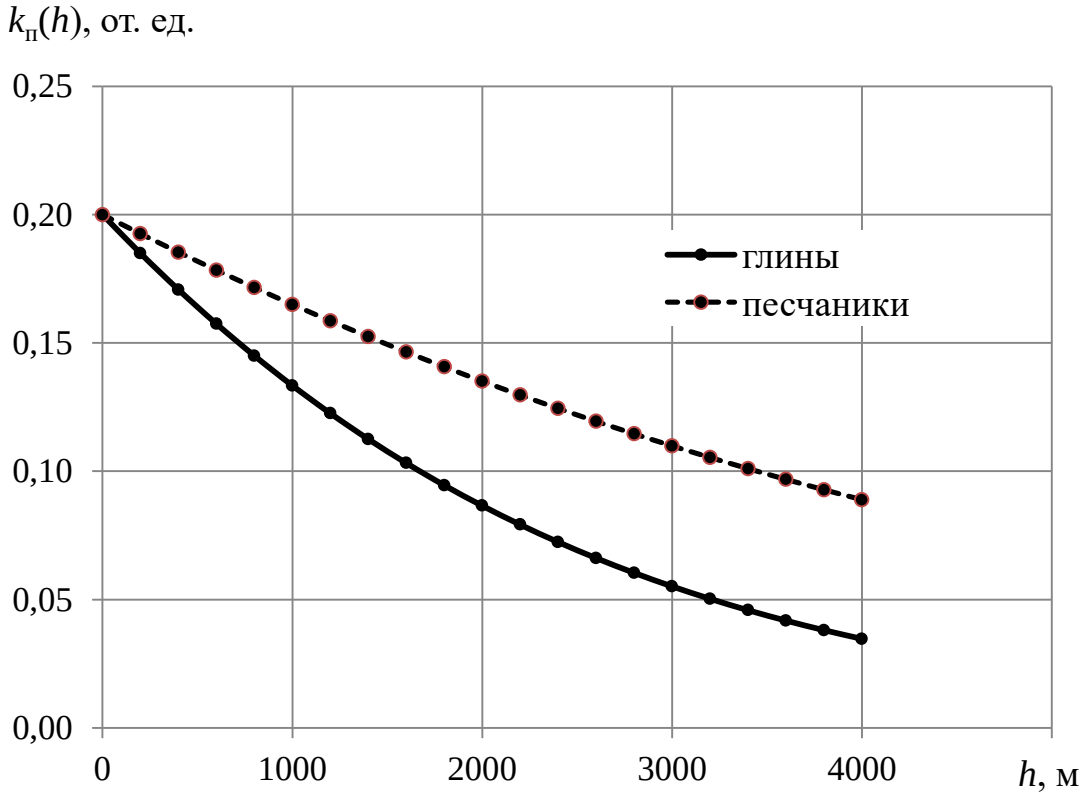


Рис. 8.1. Изменение коэффициента пористости породы с глубиной

Изменение *коэффициента необратимого уплотнения* глинистых пород во времени происходит по следующей закономерности, установленной эмпирическим путем (В. М. Добрынин, Л. А. Буряковский):

$$\beta_п = (26{,}6 \cdot \lg t - 8{,}42)10^{-3}, \qquad (8.12)$$

где t – геологический возраст пород в млн. лет.

На рис. 8.2 в линейном (а) и полулогарифмическом (б) масштабах приведена закономерность, отраженная в формуле (8.12).

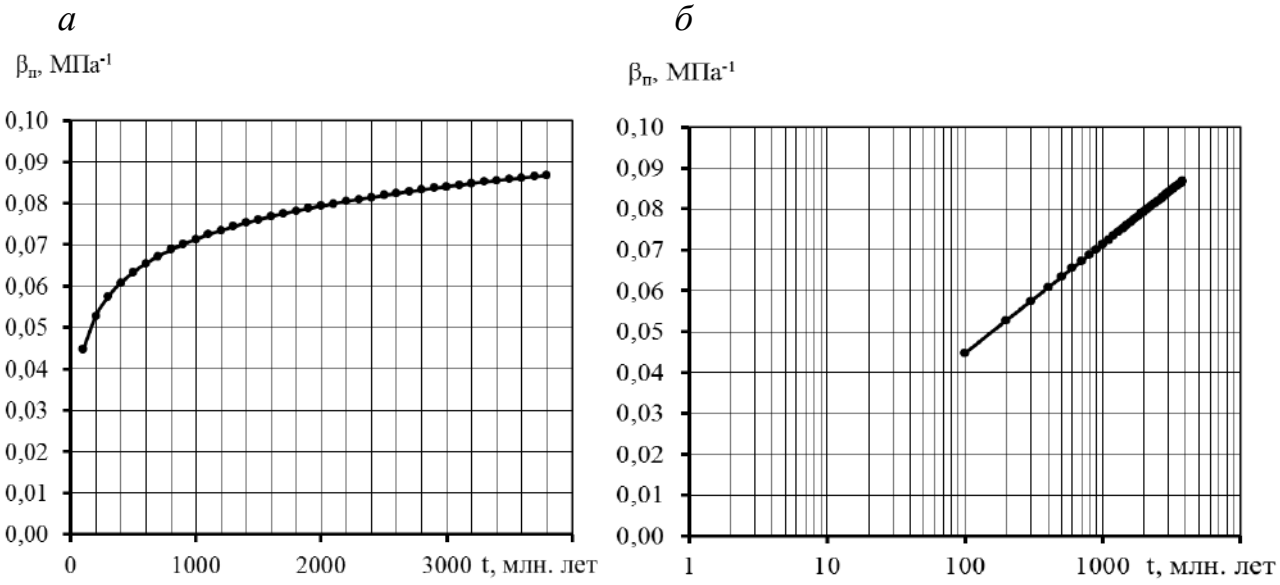


Рис. 8.2. Влияние геологического возраста глинистых пород t на коэффициент их необратимого уплотнения $\beta_п$:

а – линейный масштаб;

б – логарифмический масштаб

Задание

1) Для указанных преподавателем пород (табл. 8.1) рассчитать зависимость коэффициента их пористости $k_п$ от глубины залегания h. Для расчета использовать формулу (8.11). Глубину h именять от 0 до 4000 м с шагом 200 м. Плотность воды $\delta_в$ в порах пород принять равной 1 г/см^3.

При расчетах значения плотности перевести из г/см^3 в кг/м^3, значения $\beta_п$ – из МПа$^{-1}$ в Па$^{-1}$.

Результаты представить в виде графика, как показано на рис 8.1. Сделать выводы.

2) Оценить влияние геологического возраста пород t на коэффициент необратимого уплотнения $\beta_п$ глинистых пород. Для этого, используя эмпирическую зависимость (8.12), построить график $\beta_п = f(t)$, как показано на рис. 8.2. Сделать выводы.

Таблица 8.1

Песчано-глинистые породы мезозоя-кайнозоя Туранской плиты

Порода	*Вариант* ***1***			*Вариант* ***2***			*Вариант* ***3***			*Вариант* ***4***		
	песчаник слабоглинистый	глинистый алевролит	аргиллит	песчаник слабоглинистый	песчаник глинистый	аргиллит	песчаник слабоглинистый	глинистый алевролит	аргиллит	песчаник слабоглинистый	песчаник глинистый	аргиллит
$k_п(0)$, отн. ед.	0,15	0,15	0,15	0,16	0,16	0,16	0,17	0,17	0,17	0,18	0,18	0,18
$\delta_п$, г/см^3	2,57	2,61	2,59	2,45	2,42	2,43	2,37	2,39	2,38	2,34	2,36	2,35
$\beta_п$, МПа$^{-1}$	15,6	31,1	40,4	16,4	30,3	42,2	16,7	32,4	44,1	17,0	33,1	46,3

Порода	*Вариант* ***5***			*Вариант* ***6***			*Вариант* ***7***			*Вариант* ***8***		
	песчаник слабоглинистый	глинистый алевролит	глина	песчаник слабоглинистый	песчаник глинистый	тонкоотмученные глины	песчаник слабоглинистый	глинистый алевролит	глина	песчаник слабоглинистый	песчаник глинистый	тонкоотмученные глины
$k_п(0)$, отн. ед.	0,2	0,2	0,2	0,21	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23
$\delta_п$, г/см^3	2,31	2,33	2,32	2,3	2,31	2,3	2,24	2,22	2,25	2,11	2,13	2,12
$\beta_п$, МПа$^{-1}$	17,6	34,3	47,9	18,1	34,7	48,6	18,7	35,2	48,9	19,1	35,8	49,3

Порода	*Вариант* ***9***			*Вариант* ***10***			*Вариант* ***11***			*Вариант* ***12***		
	песчаник слабоглинистый	глинистый алевролит	аргиллит	песчаник слабоглинистый	песчаник глинистый	аргиллит	песчаник слабоглинистый	глинистый алевролит	аргиллит	песчаник слабоглинистый	песчаник глинистый	аргиллит
$k_п(0)$, отн. ед.	0,15	0,15	0,15	0,16	0,16	0,16	0,17	0,17	0,17	0,18	0,18	0,18
$\delta_п$, г/см^3	2,44	2,48	2,46	2,33	2,30	2,31	2,25	2,27	2,26	2,22	2,24	2,23
$\beta_п$, МПа$^{-1}$	14,8	29,5	38,4	15,6	28,8	40,1	15,9	30,8	41,9	16,2	31,4	44,0

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Александрова Ж. Н.* Петрофизика коллекторов: учеб. пособие. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2006. – 153 с.

2. *Петрофизика (физика горных пород)*: учеб. для вузов / под ред. Д. А. Кожевникова – М.: Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2004. – 368 с.

3. *Дахнов В. Н.* Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефте-газонасыщения горных пород. – М.: Недра, 1985. – 310 с.

4. *Интерпретация результатов геофизических исследований нефтяных и газовых скважин*: справочник / под ред. В. М. Добрынина. – М.: Недра, 1988. – 476 с.

5. *Кобранова В. Н.* Петрофизика: учеб. для вузов. – М.: Недра, 1986. – 392 с.

Учебное издание

Александрова Жанна Николаевна

ПРАКТИКУМ ПО ПЕТРОФИЗИКЕ

Часть 1

Руководство по выполнению лабораторных работ
по дисциплине «Петрофизика» для студентов
специализации «Геофизические методы исследования скважин»
направления 21.05.03 − «Технология геологической разведки»
очной и заочной форм обучения

Редактор изд-ва *В. В. Баклаева*
Компьютерная верстка *Ж. Н. Александровой*

Подписано в печать
Бумага писчая. Формат 60 x 84 1/16.
Гарнитура Times New Roman. Печать на ризографе.
Печ. л. 2,3. Уч.-изд. л. 2,05. Тираж 80. Заказ

Издательство УГГУ
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30
Уральский государственный горный университет
Отпечатано с оригинал-макета
в лаборатории множительной техники УГГУ

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебно-методическому комплексу
_____ С.А. Упоров

ПРАКТИКУМ ПО ПЕТРОФИЗИКЕ

Часть 2

Специальность:

21.05.03 Технология геологической разведки

форма обучения: очная, заочная

Автор: Александрова Ж. Н.

Екатеринбург

2020

Федеральное агентство по образованию
ФГБОУ ВО

«Уральский государственный горный университет»

Ж. Н. Александрова

ПРАКТИКУМ ПО ПЕТРОФИЗИКЕ

Руководство по выполнению практических работ
по дисциплине «Петрофизика» для студентов
специализации «Геофизические методы исследования скважин»
специальности 21.05.03 Технология геологической разведки
очной и заочной формы обучения

Часть 2

Екатеринбург
2020

Федеральное агентство по образованию
ФГБОУ ВО
«Уральский государственный горный университет»

ОДОБРЕНО
Методической комиссией
факультета геологии и геофизики УГГУ
20.03. 2020 г.
Председатель комиссии

_____
проф. В.И. Бондарев

Ж. Н. Александрова

ПРАКТИКУМ ПО ПЕТРОФИЗИКЕ

Руководство по выполнению практических работ
по дисциплине «Петрофизика» для студентов
специализации «Геофизические методы исследования скважин»
специальности 21.05.03 Технология геологической разведки
очной и заочной формы обучения

Часть 2

Издание УГГУ Екатеринбург, 2020

УДК 550.83
А46

Рецензент: Писецкий В.Б., д-р геол.-мин. наук, профессор,
заведующий кафедрой геоинформатики УГГУ

Методическое руководство рассмотрено на заседании кафедры геофизики « 05 » 03 2020 г. (протокол № 12) и рекомендовано к изданию в УГГУ.

Александрова Ж.Н.

А46 Практикум по петрофизике: руководство по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Петрофизика» для студентов специализации «Геофизические методы исследования скважин» специ-альности 21.05.03 Технология геологической разведки очной и заочной формы обучения. Часть 2 / Ж.Н. Александрова; Уральский гос. горный ун-т. – Екатеринбург: изд-во УГГУ, 2020. – 54 с.

Успешное использование геофизических методов в нефтегазовой отрасли возможно только при детальном изучении петрофизических характеристик горных пород. Это в особенности относится к геофизическим методам исследования скважин, так как по данным определения физических свойств не только выделяются отдельные разности пород, но и с высокой точностью устанавливаются их элементный состав, содержание полезных ископаемых и т.д.

Для каждой практической работы дано краткое изложение теоретических основ и порядок работы.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по специальности «Технология геологической разведки» со специализацией «Геофизические методы исследования скважин».

© Александрова Ж.Н., 2020
© Уральский государственный горный университет, 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ ……..… 4

Лабораторная работа № 1 **Определение содержания естественно радиоактивных элементов в горных породах**…….. 5

Лабораторная работа № 2. **Исследование корреляционно-функциональной связи между радиоактивностью и глинистостью терригенных отложений**..... 15

Лабораторная работа № 3. **Определение линейного коэффициента ослабления гамма-излучения при прохождении через вещество** …….. 20

Лабораторная работа № 4. **Исследование связи между пористостью терригенных отложений и рассеянием гамма-квантов в них** ……...… 23

Лабораторная работа № 5. **Расчет нейтронных параметров горных пород** ……26

Лабораторная работа № 6. **Изучение влияния минерализации пластовой воды на нейтронные параметры коллекторов** ……....33

Лабораторная работа № 7. **Изучение пористости горных пород по данным ядерно-магнитных исследований керна** ……..… 36

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ …… 54

ВВЕДЕНИЕ

Методы ядерной геофизики в настоящее время являются информационным ядром современного комплекса ГИС, используемого при изучении месторождений углеводородов. Именно ядерные методы ГИС считаются наиболее перспективным направлением, так как они характеризуются высокой информативностью и дают возможность выполнять исследования в ситуациях, когда большинство других методов невозможно использовать, например, в обсаженных скважинах.

Интерпретационно-алгоритмическое обеспечение ядерных методов ГИС невозможно без петрофизического обоснования. Установление связей между фильтрационно-емкостными свойствами пород и их гамма-лучевыми и нейтронными свойствами, а также естественной радиоактивностью является основой интерпретации результатов измерений гамма- и нейтронных потоков в скважинах. Наличие петрофизических связей позволяет перейти от измеренных параметров к параметрам, характеризующим литологию, фильтрационно-емкостные свойства пород, вещественный состав и т.д.

К основным радиационным (радиоактивным и ядерно-физическим) свойствам минералов и горных пород относят естественную радиоактивность, а также их способность по-разному рассеивать и поглощать гамма-кванты или нейтроны разных энергий.

Значительная дифференциация горных пород по естественной радиоактивности позволяет по интенсивности естественного гамма-излучения проводить литологическое расчленение разрезов скважин, определять глинистость, проводить корреляцию отложений, литолого-генетический и георитмологический анализ и др.

По степени ослабления гамма-излучения (из-за рассеяния и поглощения в веществе) можно определять плотность горных пород, их пористость, изучать техническое состояние скважин, свойства бурового раствора и т.д.

Нейтронные свойства горных пород связаны с их пористостью, водо-, нефте- и газонасыщенностью, химическим составом твердой и жидкой фаз и др. Поэтому, измеряя пространственно-энергетическое и временное распределение нейтронов в горных породах, можно определять их коллекторские свойства, выявлять продуктивные объекты и прогнозировать их промышленные запасы, контролировать разработку отдельных залежей и целых месторождений, проводить элементный анализ пород и решать другие важные задачи.

Лабораторная работа № 1

Определение содержания естественно радиоактивных элементов в горных породах

В геологическую практику прочно вошли методы ядерной геофизики, использующие естественные и искусственные процессы радиоактивности для решения ряда научных и прикладных задач.

Естественная радиоактивность горных пород определяется, прежде всего, радиоактивностью породообразующих минералов. В зависимости от качественного и количественного состава минералов, входящих в состав горных пород, условий образования, возраста и степени метаморфизма их радиоактивность изменяется в очень широких пределах.

Так как большая часть нефтегазовых месторождений приурочено к терригенным отложениям, то объектом изучения в нефтегазопромысловой геологии в основном являются осадочные породы. К практически нерадиоактивным относятся такие осадочные породы как ангидрит, гипс, каменная соль, известняк, доломит, кварцевый песок и др. Средняя радиоактивность характерна для заглинизированных песков, песчаников, известняков и доломитов, алевритов и мергелей, причем их радиоактивность возрастает с ростом степени глинистости. Повышенная радиоактивность характерна для глин, глинистых сланцев, фосфоритов и калийных солей. Часто повышенной радиоактивностью обладают каменные угли и битумы, иногда и чистые пески, песчаники и известняки, если они обогащены монацитовыми, глауконитовыми фракциями.

Значительная дифференциация горных пород по естественной радиоактивности является основой бескернового изучения геологического разреза скважин.

В нефтегазовой геологии радиоактивность горных пород изучают для решения следующих задач:

− установления пределов изменения гамма-активности литологически различных пород с целью корреляции немых толщ и классификации пород по минеральному составу;

− выяснения закономерностей изменения гамма-активности и содержания радиоактивных элементов в зависимости от глинистости в отложениях с одинаковым минеральным составом тонкодисперсных фракций;

− реконструкции условий осадконакопления пород и выяснения

цикличности процессов их образования (литолого-генетический анализ);

− выяснения связей концентрации радиоактивных элементов с фациальной характеристикой отложений и тектоническим развитием структур, благоприятных для скопления нефти и газа;

− выяснения взаимоотношения радиоактивности пород с их геохимическими особенностями: доломитизацией известняков, битуминизацией пород и радиогеохимическими аномалиями в зоне водонефтяных контактов (ВНК).

Основным методом изучения естественной радиоактивности горных пород в разрезе скважин является гамма-каротаж (ГК). С его помощью в нефтегазопромысловой геологии проводят количественное определение содержаний калия, урана и тория (спектрометрическая модификация ГК) и суммарного содержания радиоактивных элементов (интегральная модификация ГК). На этом основана возможность определения глинистости, идентификации минерального состава глинистого материала, оценки содержания органического вещества, изучения условий осадконакопления с помощью литолого-генетического анализа.

Высокая петрофизическая информативность ГК обусловлена особой ролью глин и конкретных глинистых минералов в формировании залежей углеводородов, определяющим влиянием глин на фильтрационно-емкостные свойства коллекторов. В скважинах, заполненных соленой промывочной жидкостью, когда кривая ПС слабо дифференцирована, глинистость нельзя определить без учета данных ГК.

Спектрометрическая модификация ГК (ГК-С) основана на том, что гамма-кванты радиоактивных элементов имеют разную энергию и, соответственно, спектры излучения этих элементов существенно отличаются (рис. 1.1, 1.2, 1.3).

Основными γ-излучателями в семействе урана являются продукты распада радия (Ra^{226}) и радона (Rn^{222}). Важной особенностью этого семейства является то, что на долю продуктов распада урана, расположенных в цепи превращения до радия, приходится всего лишь около 2% от общего γ-излучения ряда. Вследствие этого при нарушении в горных породах радиоактивного равновесия между ураном и радием, приводящего к недостатку радия, γ- активность горных пород резко снижается, и, наоборот, породы, обогащенные солями радия или радоном, даже при отсутствии в них урана являются γ- активными.

В семействе тория основные γ-излучатели распределены относительно равномерно.

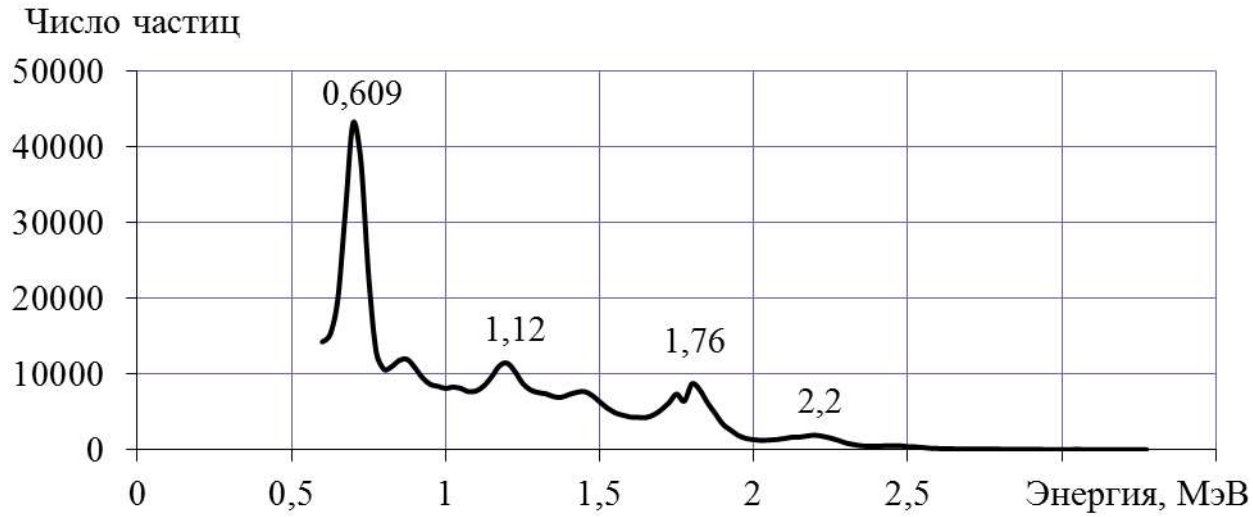


Рис. 1.1. Аппаратурный спектр гамма-излучения урана и продуктов его распада

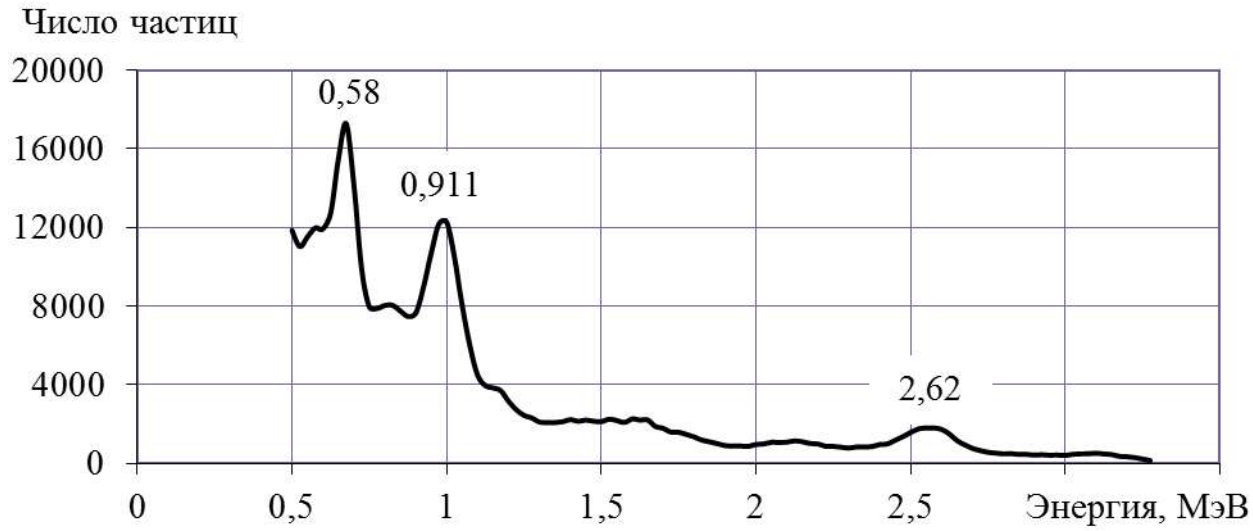


Рис. 1.2. Аппаратурный спектр гамма-излучения тория и продуктов его распада

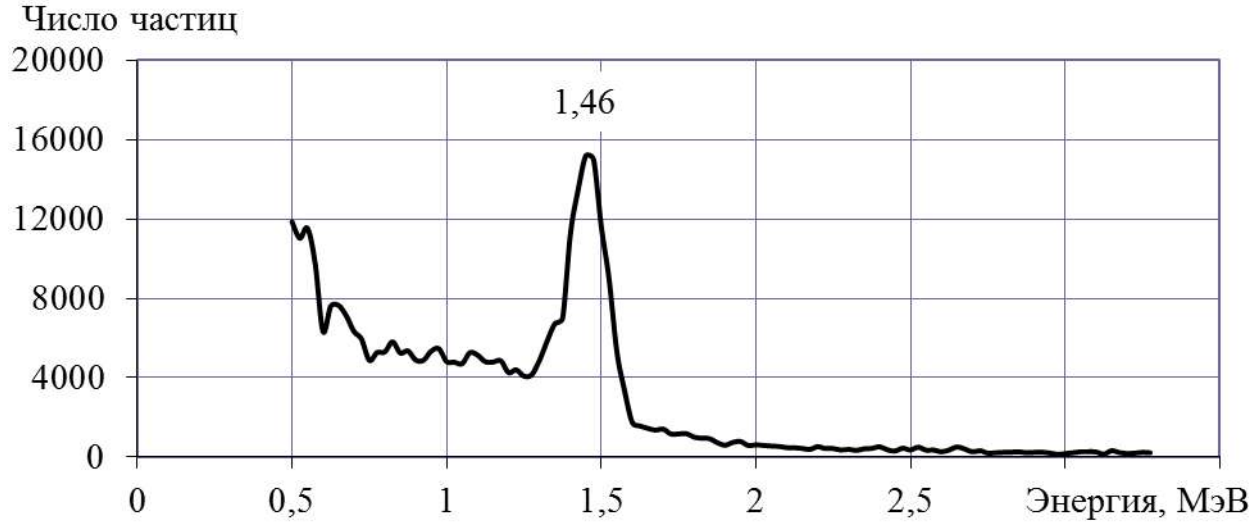


Рис. 1.3. Аппаратурный спектр гамма-излучения калия

У изотопа K^{40} на спектре только одна линия.

В таблице 1.1 приведены сведения об основных γ-излучателях в рядах урана и тория, а также для изотопа K^{40}.

Таблица 1.1

Основные γ-излучатели в ряду урана						
Изотоп	Pb^{214}	Pb^{214}	Bi^{214}	Bi^{214}	Bi^{214}	Bi^{214}
E (МэВ)	0,295	0,352	0,609	1,112	1,764	2,204
% выхода	10,0	19,4	22,3	7,8	8,4	2,6
Основные γ-излучатели в ряду тория						
Изотоп	Pb^{212}	Ac^{228}	Tl^{208}	Ac^{228}	Ac^{228}	Tl^{208}
E (МэВ)	0.239	0.338	0.583	0.911	0.967	2.615
% выхода	22,5	6,2	15,0	14,5	11,5	17,9
γ-излучатели среди изотопов калия						
Изотоп	K^{40}					
E (МэВ)	1,46					
% выхода	100					

Для изучения спектра гамма-излучения используются детекторы, регистрирующие гамма-излучение и передающие сигналы на анализатор импульсов в виде различных амплитуд, соответствующих определенному энергетическому уровню. Детекторы могут быть двух типов: сцинтилляционные и полупроводниковые.

Полупроводниковые (германий-литиевые) обладают малыми размерами и высокой разрешающей способностью (E_γ=0,2÷2,5 МэВ). Однако трудности создания больших объемов чувствительной области и относительно невысокая чувствительность (ε = 1÷10 %) регистрации гамма-квантов препятствуют широкому их использованию, особенно для низкоактивных пород. Изучение гамма-спектров низкоактивных пород производится главным образом сцинтилляционными детекторами.

Регистрация импульсов, поступающих от детекторов, осуществляется многоканальными анализаторами импульсов. Каждый канал способен накапливать импульсы определенной амплитуды, соответствующие установленной энергии гамма-квантов.

Определение содержания урана, радия, тория и калия заключается в регистрации спектров гамма-излучения образца породы, эталонов перечисленных элементов, фона с последующей количественной обработкой результатов измерений.

Спектр гамма-излучения, зарегистрированный амплитудным анализатором импульсов, называется аппаратурным спектром (рис.1.1, 1.2, 1.3). Этот спектр существенно отличается от первичного спектра гамма-излучения радиоизотопа вследствие сложных процессов взаимодействия гамма-квантов с веществом сцинтиллятора, а также из-за статистических процессов, возникающих в фотоумножителе и анализаторе.

Дифференциация аппаратурных спектров улучшается с уменьшением разрешающей способности спектрометра, которая оценивается величиной R, равной отношению ширины $\Delta E_{1/2}$ фотопика изотопа на половине его высоты к энергии E_o первичного гамма-излучения (рис. 1.4).

$$R = \left(\Delta E / E_o\right) \cdot 100\,\% \qquad (1.1)$$

Величина R равна 6÷10 % для гамма-спектрометров на сцинтилляционных и 0,1÷1 % на полупроводниковых детекторах.

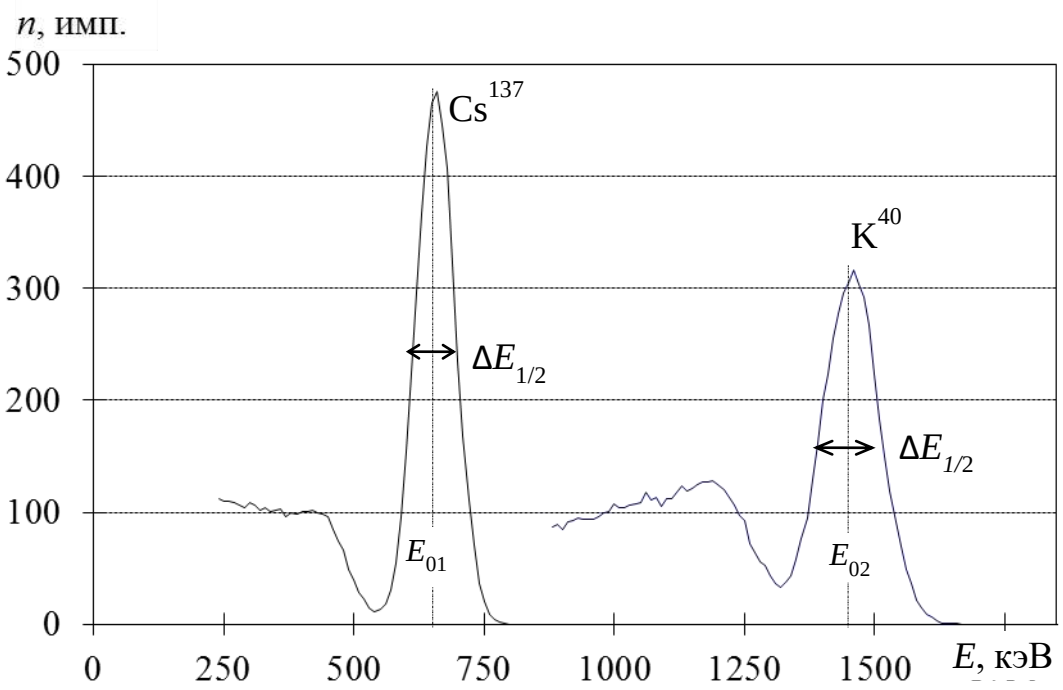


Рис. 1.4. Определение энергетического разрешения спектрометра

Идентификация радиоактивных элементов осуществляется по энергиям фотопиков анализируемого аппаратурного спектра, градуировку энергетической шкалы которого осуществляют по зависимости номера канала спектрометра от энергии эталонных излучателей: Cs^{137} (E_o=0,662 МэВ), Co ^{60} (E_o=1,17 и 1,33 МэВ), а также эталонов Ra, Th, K и их изотопов RaC, RaC", ThC, ThC", $MsTh_2$, ThB (рис. 1.5).

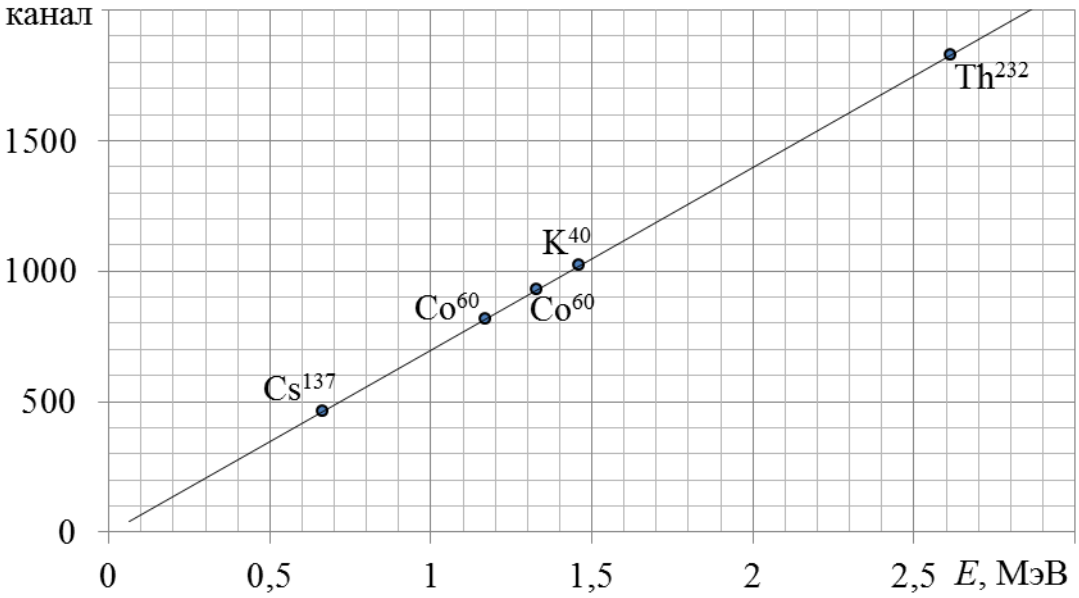


Рис. 1.5. Калибровка энергетической шкалы спектрометра.

Концентрация радиоактивных элементов определяется путем сравнения интенсивностей гамма-излучения анализируемой породы $I_{\text{п}}$ и i-х эталонов (Ra, Th и K) в определенных j-х интервалах энергий E_j.

Регистрируемая интенсивность гамма-излучения для определенного интервала энергий спектра складывается из интенсивности излучения породы $I_{\text{п}j}$ и фона $I_{\text{ф}j}$.

$$I_{\text{п}+\phi} = I_{\text{п}j} + I_{\text{ф}j} \qquad (1.2)$$

Величина $I_{\text{п}j}$ является суммой интенсивностей излучения отдельных i-х радиоактивных элементов в данном j-м интервале энергий:

$$I_{\text{п}j} = \sum_{i,j=1}^{N} a_{ij} \cdot Q_{ij} \qquad (1.3)$$

где a_{ij} — спектральный коэффициент, равный интенсивности гамма-излучения, зарегистрированной в j-м интервале энергий от единичной концентрации i-го радиоактивного элемента и Q_i — концентрации i-того элемента в образце.

Концентрации Q_i радиоактивных элементов могут быть найдены решением системы уравнений (1.3), в которых a_{ij} и $I_{\text{п}j}$ определяются экспериментально.

Величина интенсивности $I_{\text{п}j}$ наиболее точно может быть определена по площади соответствующего фотопика. На практике величина $I_{\text{п}j}$ обычно определяется либо по модальному (максимальному) значению интенсивности в фотопике, либо по сумме нескольких значений $I_{\text{п}j}$ в области максимума фотопика.

При спектроскопии естественного гамма-излучения горных пород с помощью сцинтилляционных детекторов для определения радия, тория и калия обычно используют один из фотопиков: радия — 0,35; 0,607 или 1,761 МэВ; тория — 0,238; 0,907 или 2,62 МэВ, калия – 1,46 МэВ (табл. 1.2).

Часто при количественной обработке для повышения точности используют две системы энергетических интервалов — в мягкой (0,35; 0,238 и 1,46 МэВ) и жесткой (1,76; 2,62 и 1,46 МэВ) областях спектра.

Для повышения чувствительности гамма-спектрометрической установки рекомендуется применять большие кристаллы NaJ(T1) (до 100х150 мм) и навески образцов до 1500 г. Во избежание искажающего влияния рассеянного гамма-излучения на анализируемый спектр, в случае изучения больших объемов образца и в целях сопоставления результатов лабораторных и скважинных исследований, рекомендуется использовать жесткую часть спектра с энергией гамма-квантов свыше 0,5 МэВ. Исходя из условий минимизации погрешностей, для количественной обработки спектрограмм гамма-излучения горных пород используют фотопики, соответствующие энергиям 0,607 МэВ (RaC); 0,907 МэВ ($MsTh_2$) и 1,46 МэВ (K^{40}).

Содержание Q_{Ra} радия, Q_{Th} тория и Q_K калия рассчитывают решением системы уравнений:

$$\begin{cases} I_{Ra} = a_1 Q_K + a_2 Q_{Ra} + a_3 Q_{Th}, \\ I_{Th} = b_1 Q_K + b_2 Q_{Ra} + b_3 Q_{Th}, \\ I_K = c_1 Q_K + c_2 Q_{Ra} + c_3 Q_{Th}. \end{cases} \qquad (1.4)$$

Числовые значения спектральных коэффициентов a_i, b_i, c_i, входящих в уравнение (11.4), определяют экспериментально при регистрации спектров гамма-излучения радиевого, ториевого и калиевого эталонов и рассчитывают по соотношению

$$a_i, b_i, c_i = \frac{(I_{этij} - I_{фj}) m_п}{m_{этi} Q_{этi}}, \qquad (1.5)$$

где $I_{этij}$ - интенсивность гамма-излучения, регистрируемая от данного i-го эталона в определенном j-м энергетическом интервале; $I_{фi}$ - фоновая интенсивность гамма-излучения в том же j-м энергетическом интервале (имп/мин); $m_п$ и $m_{этi}$ - масса породы (г) и соответствующих эталонов; $Q_{этi}$ - концентрация соответствующего радиоэлемента в i-м эталоне (г/г или %).

Решение системы (1.4) уравнений может быть записано в сле-

дующем виде:

$$\begin{aligned} Q_{\mathrm{Ra}} &= A_1 I_{\mathrm{K}} + A_2 I_{\mathrm{Ra}} + A_3 I_{\mathrm{Th}}, \\ Q_{\mathrm{Th}} &= B_1 I_{\mathrm{K}} + B_2 I_{\mathrm{Ra}} + B_3 I_{\mathrm{Th}}, \\ Q_{\mathrm{K}} &= C_1 I_{\mathrm{K}} + C_2 I_{\mathrm{Ra}} + C_3 I_{\mathrm{Th}}, \end{aligned} \qquad (1.6)$$

где I_{K}, I_{Ra}, I_{Th} – интенсивности гамма-излучения пробы, зарегистрированные соответственно в калиевом, радиевом и ториевом энергетических интервалах; A_i, B_i, C_i – коэффициенты разделения (коэффициенты обратной матрицы, составленной из коэффициентов a_i, b_i, c_i, которые вычисляются по следующим формулам

$$A_1 = \frac{b_2 c_3 - b_3 c_2}{D}, \quad A_2 = \frac{b_3 c_1 - b_1 c_3}{D}, \quad A_3 = \frac{b_1 c_2 - b_2 c_1}{D}, \qquad (1.7)$$

$$B_1 = \frac{c_2 a_3 - c_3 a_2}{D}, \quad B_2 = \frac{c_3 a_1 - c_1 a_3}{D}, \quad B_3 = \frac{c_1 a_2 - c_2 a_1}{D}, \qquad (1.8)$$

$$C_1 = \frac{a_2 b_3 - a_3 b_2}{D}, \quad C_2 = \frac{a_3 b_1 - a_1 b_3}{D}, \quad C_3 = \frac{a_1 b_2 - a_2 b_1}{D}. \qquad (1.9)$$

Здесь $D = a_1(b_2 c_3 - b_3 c_2) + a_2(b_3 c_1 - b_1 c_3) + a_3(b_1 c_2 - b_2 c_1)$.

Лабораторные спектрометры энергий гамма-излучения, как правило, состоят из сцинтилляционного блока детектирования с кристаллом NaJ(Tl), свинцовой защиты, амплитудно-цифрового преобразователя, встроенного в материнскую плату персонального компьютера и принтера.

Установка «Гамма-01С» (рис. 1.6) позволяет выполнять качественный и количественный анализ разнообразных проб окружающей среды на содержание гамма-излучающих радионуклидов. Диапазон регистрируемых энергий гамма-излучения от 0,03 до 3 МэВ. Относительное энергетическое разрешение по линии 0,662 МэВ не более 8.3 %. Данный спектрометр имеет следующие функциональные возможности:

− измерение спектров гамма-излучения с экспозициями по "живому" и реальному времени в диапазоне от 1 сек до 18 часов;

− встроенную систему стабилизации усиления по реперному пику светодиода;

− энергетическую калибровку по 2, 3 или 4 пикам в спектре;

− автоматическую обработку спектров, включая идентификацию радионуклидов;

− возможность хранения спектров и результатов на гибком и жестком дисках;

− визуализацию спектров на экране дисплея ПЭВМ.

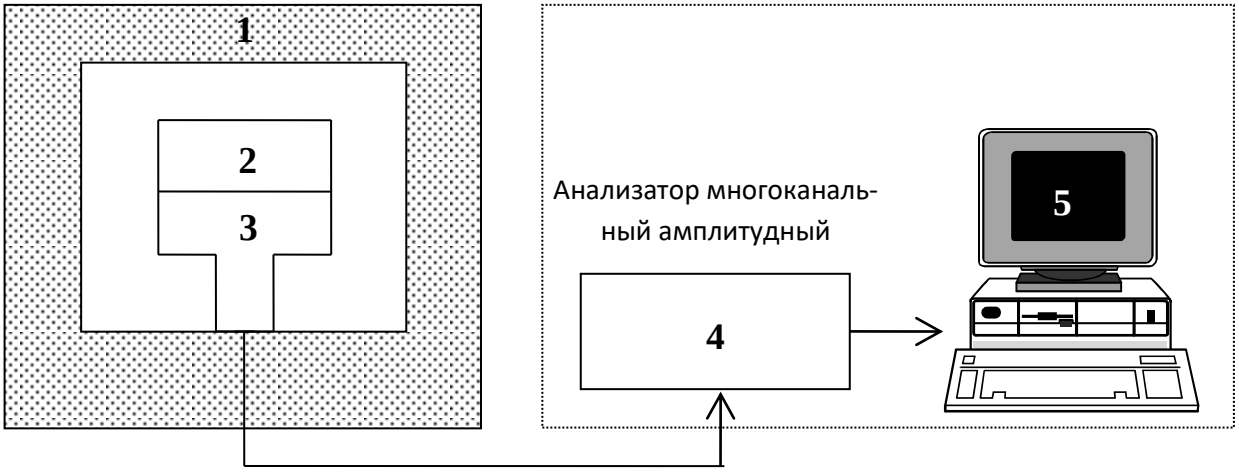


Рис. 1.6. Функциональная схема лабораторного спектрометра «Гамма-01С». Обозначения: 1-свинцовая защита, 2 - проба, 3 - блок детектирования, 4 - амплитудно-цифровой преобразователь (АЦП), 5 - персональная ЭВМ

Задание:

1. Познакомиться с работой спектрометра «Гамма-01С».
2. Определить массы эталонов урана, тория, калия и исследуемого образца.
3. Зарегистрировать спектры гамма-излучения эталонов. Сохранить их на жестком диске компьютеризированной установки «Гамма-01С».
4. Выделить энергетические окна урана, тория и калия.
5. Записать для каждого эталона интенсивность гамма-излучения во всех трех энергетических окнах:

Измерения на эталонных образцах			
Энергетическое окно	Эталон урана I_{Uj} , имп.	Эталон тория I_{Thj} , имп.	Эталон калия I_{Kj} , имп.
К			
У			
Т			

6. Зарегистрировать спектр фонового гамма-излучения. Записать интенсивность гамма-излучения во всех трех энергетических окнах:

Измерения фонового излучения	
Энергетическое окно	Отсчет $I_{фj}$
К	
У	
Т	

7. Записать для каждого эталона интенсивность гамма-излучения во всех трех энергетических окнах за вычетом фонового гамма-излучения:

Энергетическое окно	Эталон урана I_{Uj}-$I_{фj}$, имп.	Эталон тория I_{Thj}-$I_{фj}$, имп.	Эталон калия I_{Kj}-$I_{фj}$, имп.
К			
У			
Т			

8. Вычислить спектральные коэффициенты $a_i=I_{Uj}/Q_{этU}$, $b_i= I_{Thj}/Q_{этTh}$, $c_i= I_{Kj}/Q_{этK}$ и записать в таблицу:

Энергетическое окно	Эталон урана $a_i=I_{Uj}/Q_{этU}$, имп. / %		Эталон тория $b_i= I_{Thj}/Q_{этTh}$, имп. / %		Эталон калия $c_i= I_{Kj}/Q_{этK}$, имп. / %	
К	a_1		b_1		c_1	
У	a_2		b_2		c_2	
Т	a_3		b_3		c_3	

9. По формулам (1.7-1.9) рассчитать коэффициенты разделения A_i, B_i, C_i урана, тория и калия:

Энергетическое окно	Эталон урана A_i, % / имп		Эталон тория B_i, % / имп		Эталон калия C_i, % / имп	
К	A_1		B_1		C_1	
У	A_2		B_2		C_2	
Т	A_3		B_3		C_3	

10. Записать расчетные формулы с численными значениями A_i, B_i, C_i для раздельного определения содержания радиоактивных элементов в образцах горных пород:

$$\begin{aligned} Q_{Ra} &= A_1 I_K + A_2 I_{Ra} + A_3 I_{Th}\ , \\ Q_{Th} &= B_1 I_K + B_2 I_{Ra} + B_3 I_{Th}\ , \\ Q_K &= C_1 I_K + C_2 I_{Ra} + C_3 I_{Th}\ , \end{aligned} \qquad (1.10)$$

11. Зарегистрировать спектры гамма-излучения исследуемых образцов песчаника, аргиллита и глины.

12. Записать для каждого образца интенсивности гамма-излучения I_j во всех трех энергетических окнах.

Измерения на образцах горных пород			
Энергетическое окно	Песчаник $I_j^{пес}$, имп.	Аргиллит $I_j^{арг}$, имп.	Глина $I_j^{гл}$, имп.
К			
У			
Т			

13. По формулам (1.10) рассчитать содержания радиоактивных элементов в исследуемых образцах.

14. Сделать выводы о связи количества глинистого материала в образце с содержанием радиоактивных элементов.

Лабораторная работа № 2

Исследование корреляционно-функциональной связи между радиоактивностью и глинистостью терригенных отложений

Особенности физических свойств глинистой составляющей твердой фазы горных пород позволяют по геофизическим данным определить ее объемное содержание в коллекторе. Для этого используют методы естественного гамма-излучения (ГК) и потенциалов самопроизвольной поляризации (ПС) пород.

Определение коэффициента глинистости по данным гамма-метода основано на степенной, близкой к линейной, зависимости естественного гамма-излучения песчано-глинистых и карбонатных пород от коэффициента глинистости $k_{гл}$ в тех случаях, когда грубодисперсная фракция коллектора имеет низкую гамма-активность. При этом

$$k_{гл} = a \cdot \Delta I^{b} \qquad (2.1)$$

где a и b – коэффициенты, устанавливаемые экспериментально по результатам исследования кернового материала, ΔI – относительная радиоактивность горных пород по разрезу скважины (или двойной разностный параметр).

Двойной разностный параметр вычисляют следующим образом:

$$\Delta I = \frac{I - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}}\ , \qquad (2.2)$$

где I, $I_{\min}$, $I_{\max}$ – интенсивности, зарегистрированные соответственно над исследуемой породой, над чистым кварцевым песчаником (или известняком) и над глиной.

Задание

По результатам исследования кернового материала, извлеченного из скважины, получены данные о глинистости горных пород, а по данным гамма-каротажа получены данные об их радиоактивности (таблица 2.1).

1. Для заданного варианта построить графики $I=f(h)$ и $k_{гл}=f(h)$ (рис.2.1).

2. Используя регрессионный анализ, установить зависимость коэффициента глинистости от двойного разностного параметра ΔI .

Таблица 2.1

h, м	*Вариант* ***1***		*Вариант* ***2***		*Вариант* ***3***		*Вариант* ***4***	
	I, мкР/ч	$k_{гл}$, отн.ед.	*I*, мкР/ч	$k_{гл}$, отн.ед.	*I*, мкР/ч	$k_{гл}$, отн.ед.	*I*, мкР/ч	$k_{гл}$, отн.ед.
1501,0	13,8	0,001	17,5	0,001	19,9	0,001	11,6	0,003
1501,4	18,1	0,118	15,2	0,080	12,6	0,047	15,5	0,088
1501,8	15,4	0,082	10,4	0,001	11,1	0,023	17,9	0,118
1502,2	19,4	0,134	15,5	0,084	13,4	0,059	12,7	0,050
1502,6	18,5	0,123	11,1	0,017	19,8	0,140	14,7	0,078
1503,0	18,4	0,121	10,6	0,005	12,4	0,045	19,3	0,135
1503,4	19,8	0,139	12,8	0,044	17,2	0,110	16,3	0,099
1503,8	13,8	0,061	15,3	0,080	15,9	0,093	18,4	0,124
1504,2	15,3	0,082	10,4	0,001	10,1	0,001	12,6	0,049
1504,6	10,4	0,001	17,3	0,106	16,6	0,102	13,0	0,053
1505,0	107,3	0,962	102,7	0,901	106,6	0,906	106,0	0,919
1505,4	101,7	0,926	102,8	0,915	107,0	0,892	103,7	0,916
1505,8	104,0	0,912	103,8	0,879	107,6	0,918	103,1	0,860
1506,2	104,3	0,908	107,2	0,939	106,6	0,933	104,8	0,886
1506,6	101,9	0,912	107,6	0,897	102,4	0,925	104,6	0,922
1507,0	104,8	0,900	103,7	0,914	108,5	0,935	104,4	0,924
1507,4	104,0	0,888	108,2	0,892	107,5	0,902	102,3	0,890
1507,8	103,5	0,874	109,9	0,908	106,6	0,936	108,9	0,936
1508,2	10,8	0,009	15,2	0,079	20,0	0,143	14,8	0,079
1508,6	16,0	0,092	12,1	0,034	14,9	0,080	14,5	0,076
1509,0	17,5	0,110	16,2	0,092	16,6	0,102	16,3	0,098
1509,4	14,2	0,066	19,0	0,127	19,4	0,137	15,3	0,085
1509,8	16,7	0,100	13,2	0,051	18,4	0,125	17,2	0,109
1510,2	10,8	0,010	18,2	0,117	16,9	0,106	18,9	0,130
1510,6	12,8	0,046	12,3	0,037	16,5	0,100	14,5	0,075
1511,0	17,1	0,106	16,8	0,100	13,4	0,059	16,7	0,104
1511,4	15,5	0,084	18,2	0,117	16,8	0,105	10,0	0,001
1511,8	15,9	0,090	16,6	0,097	19,0	0,131	16,0	0,094
1512,2	14,7	0,073	14,6	0,070	18,1	0,120	13,5	0,061
1512,6	13,5	0,056	12,8	0,046	16,3	0,099	16,7	0,104
1513,0	52,6	0,462	52,8	0,454	52,3	0,457	58,0	0,504
1513,4	56,1	0,493	51,4	0,442	53,3	0,465	50,7	0,442
1513,8	53,6	0,472	51,6	0,445	56,9	0,496	56,2	0,488
1514,2	58,0	0,509	59,4	0,510	59,1	0,515	53,8	0,469
1514,6	50,3	0,441	59,7	0,513	56,2	0,490	51,3	0,448
1515,0	58,2	0,511	59,8	0,514	53,9	0,470	51,6	0,449
1515,4	54,8	0,482	58,4	0,502	58,5	0,509	52,1	0,453
1515,8	19,5	0,135	15,7	0,086	14,1	0,069	12,9	0,053
1516,2	13,8	0,061	17,6	0,109	15,1	0,082	14,3	0,072
1516,6	19,2	0,131	12,0	0,032	14,1	0,069	13,3	0,058

продолжение таблицы 2.1

h, м	*Вариант* ***5***		*Вариант* ***6***		*Вариант* ***7***		*Вариант* ***8***	
	I, мкР/ч	$k_{гл}$, отн.ед.	*I*, мкР/ч	$k_{гл}$, отн.ед.	*I*, мкР/ч	$k_{гл}$, отн.ед.	*I*, мкР/ч	$k_{гл}$, отн.ед.
1501,0	19,2	0,131	12,0	0,032	14,1	0,069	13,3	0,058
1501,4	13,8	0,061	17,6	0,109	15,1	0,082	14,3	0,072
1501,8	19,5	0,135	15,7	0,086	14,1	0,069	12,9	0,053
1502,2	54,8	0,482	58,4	0,502	58,5	0,509	52,1	0,453
1502,6	58,2	0,511	59,8	0,514	53,9	0,470	51,6	0,449
1503,0	50,3	0,441	59,7	0,513	56,2	0,490	51,3	0,448
1503,4	58,0	0,509	59,4	0,510	59,1	0,515	53,8	0,469
1503,8	53,6	0,472	51,6	0,445	56,9	0,496	56,2	0,488
1504,2	56,1	0,493	51,4	0,442	53,3	0,465	50,7	0,442
1504,6	52,6	0,462	52,8	0,454	52,3	0,457	58,0	0,504
1505,0	13,5	0,056	12,8	0,046	16,3	0,099	16,7	0,104
1505,4	14,7	0,073	14,6	0,070	18,1	0,120	13,5	0,061
1505,8	15,9	0,090	16,6	0,097	19,0	0,131	16,0	0,094
1506,2	15,5	0,084	18,2	0,117	16,8	0,105	10,0	0,001
1506,6	17,1	0,106	16,8	0,100	13,4	0,059	16,7	0,104
1507,0	12,8	0,046	12,3	0,037	16,5	0,100	14,5	0,075
1507,4	10,8	0,010	18,2	0,117	16,9	0,106	18,9	0,130
1507,8	16,7	0,100	13,2	0,051	18,4	0,125	17,2	0,109
1508,2	14,2	0,066	19,0	0,127	19,4	0,137	15,3	0,085
1508,6	17,5	0,110	16,2	0,092	16,6	0,102	16,3	0,098
1509,0	16,0	0,092	12,1	0,034	14,9	0,080	14,5	0,076
1509,4	10,8	0,009	15,2	0,079	20,0	0,143	14,8	0,079
1509,8	103,5	0,874	109,9	0,908	106,6	0,936	108,9	0,936
1510,2	104,0	0,888	108,2	0,892	107,5	0,902	102,3	0,890
1510,6	104,8	0,900	103,7	0,914	108,5	0,935	104,4	0,924
1511,0	101,9	0,912	107,6	0,897	102,4	0,925	104,6	0,922
1511,4	104,3	0,908	107,2	0,939	106,6	0,933	104,8	0,886
1511,8	104,0	0,912	103,8	0,879	107,6	0,918	103,1	0,860
1512,2	101,7	0,926	102,8	0,915	107,0	0,892	103,7	0,916
1512,6	107,3	0,962	102,7	0,901	106,6	0,906	106,0	0,919
1513,0	10,4	0,001	17,3	0,106	16,6	0,102	13,0	0,053
1513,4	15,3	0,082	10,4	0,001	10,1	0,001	12,6	0,049
1513,8	13,8	0,061	15,3	0,080	15,9	0,093	18,4	0,124
1514,2	19,8	0,139	12,8	0,044	17,2	0,110	16,3	0,099
1514,6	18,4	0,121	10,6	0,005	12,4	0,045	19,3	0,135
1515,0	18,5	0,123	11,1	0,017	19,8	0,140	14,7	0,078
1515,4	19,4	0,134	15,5	0,084	13,4	0,059	12,7	0,050
1515,8	15,4	0,082	10,4	0,001	11,1	0,023	17,9	0,118
1516,2	18,1	0,118	15,2	0,080	12,6	0,047	15,5	0,088
1516,6	13,8	0,001	17,5	0,001	19,9	0,001	11,6	0,003

окончание таблицы 2.1

h, м	*Вариант* ***9***		*Вариант* ***10***		*Вариант* ***11***		*Вариант* ***12***	
	I, мкР/ч	$k_{гл}$, отн.ед.	*I*, мкР/ч	$k_{гл}$, отн.ед.	*I*, мкР/ч	$k_{гл}$, отн.ед.	*I*, мкР/ч	$k_{гл}$, отн.ед.
1501,0	17,1	0,003	15,1	0,002	15,8	0,002	10,3	0,002
1501,4	16,0	0,090	13,4	0,056	16,0	0,089	12,8	0,051
1501,8	11,2	0,018	18,8	0,126	10,5	0,001	11,2	0,026
1502,2	11,8	0,030	17,7	0,114	16,4	0,095	20,0	0,142
1502,6	15,9	0,089	14,2	0,067	11,8	0,028	17,9	0,118
1503,0	18,6	0,122	13,5	0,058	17,1	0,103	12,3	0,044
1503,4	13,3	0,051	15,1	0,080	15,0	0,075	14,2	0,071
1503,8	15,0	0,076	11,9	0,033	18,9	0,126	14,2	0,072
1504,2	17,0	0,102	15,2	0,081	18,3	0,118	18,5	0,126
1504,6	15,2	0,079	10,3	0,001	15,2	0,078	16,5	0,101
1505,0	101,4	0,900	107,7	0,934	107,6	0,958	108,5	0,925
1505,4	109,3	0,963	100,9	0,857	101,3	0,867	104,5	0,870
1505,8	109,6	0,928	109,2	0,910	104,8	0,893	106,0	0,940
1506,2	107,0	0,915	105,8	0,891	102,8	0,887	104,8	0,883
1506,6	104,2	0,867	107,1	0,908	101,3	0,904	107,3	0,933
1507,0	100,6	0,860	105,3	0,938	101,5	0,912	109,1	0,956
1507,4	102,7	0,897	103,6	0,902	105,9	0,937	101,0	0,882
1507,8	104,4	0,925	105,3	0,919	106,2	0,910	100,3	0,869
1508,2	13,7	0,059	15,6	0,087	19,3	0,130	18,8	0,129
1508,6	13,7	0,058	15,1	0,079	19,1	0,128	17,6	0,114
1509,0	13,3	0,054	15,2	0,080	19,0	0,127	19,7	0,140
1509,4	19,9	0,137	17,2	0,107	12,4	0,036	15,7	0,091
1509,8	11,7	0,028	13,4	0,057	15,0	0,077	11,4	0,027
1510,2	12,4	0,040	10,9	0,016	16,2	0,092	11,4	0,027
1510,6	10,5	0,002	17,9	0,115	11,9	0,028	12,2	0,041
1511,0	19,3	0,130	17,8	0,113	14,9	0,074	10,0	0,001
1511,4	12,7	0,043	19,5	0,134	12,8	0,043	16,4	0,099
1511,8	17,6	0,110	18,0	0,116	11,5	0,021	11,4	0,028
1512,2	10,4	0,001	10,7	0,009	17,7	0,112	14,4	0,074
1512,6	11,8	0,030	14,0	0,064	12,4	0,038	19,2	0,134
1513,0	56,6	0,488	55,8	0,484	50,1	0,438	52,6	0,458
1513,4	50,9	0,438	52,3	0,453	53,5	0,468	54,7	0,475
1513,8	57,9	0,499	56,6	0,490	59,9	0,523	57,8	0,502
1514,2	57,8	0,498	57,2	0,495	52,6	0,460	55,1	0,480
1514,6	58,9	0,507	58,3	0,504	58,1	0,508	58,3	0,506
1515,0	59,7	0,514	52,9	0,459	53,7	0,470	52,3	0,455
1515,4	56,2	0,484	50,9	0,441	52,2	0,457	50,0	0,435
1515,8	16,7	0,099	18,6	0,124	13,6	0,056	10,6	0,014
1516,2	18,5	0,120	13,6	0,060	18,6	0,122	11,8	0,035
1516,6	18,7	0,122	15,1	0,079	15,6	0,083	13,1	0,055

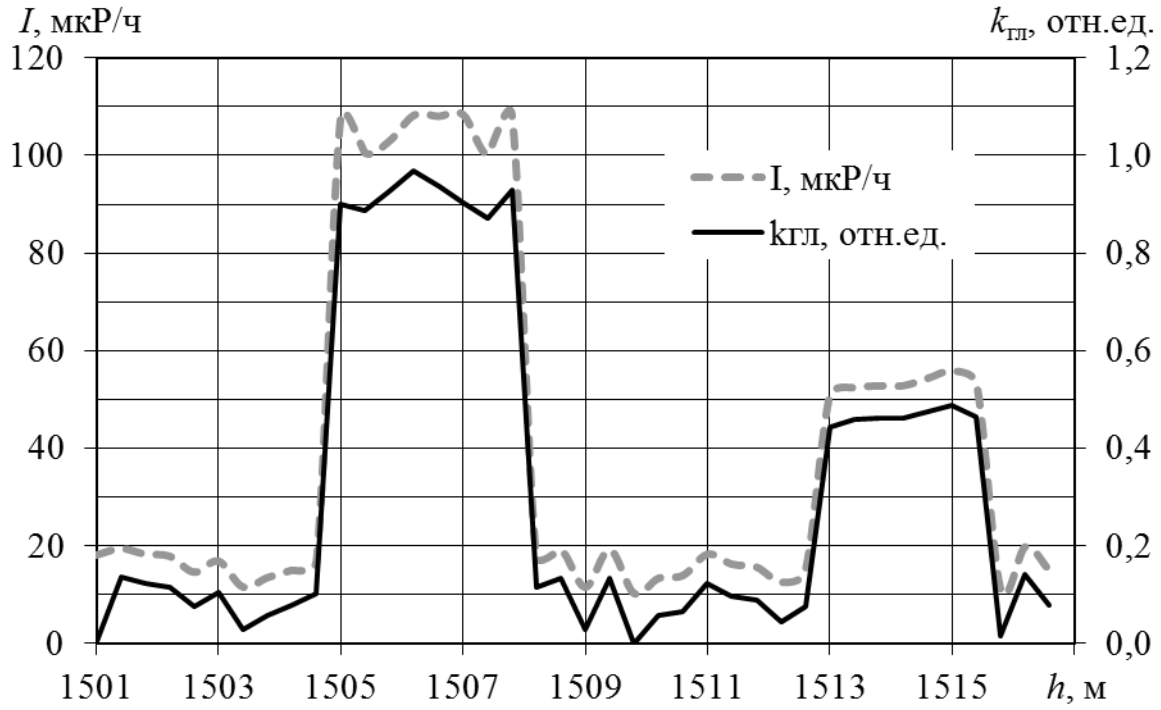


Рис. 2.1. Изменение интенсивности гамма-излучения по разрезу скважины и коэффициента глинистости по керну, извлеченному из этой скважины

3. Результаты представить в виде графика (рис. 2.2). На графике привести уравнение регрессии и коэффициент корреляции между $k_{гл}$ и ΔI.

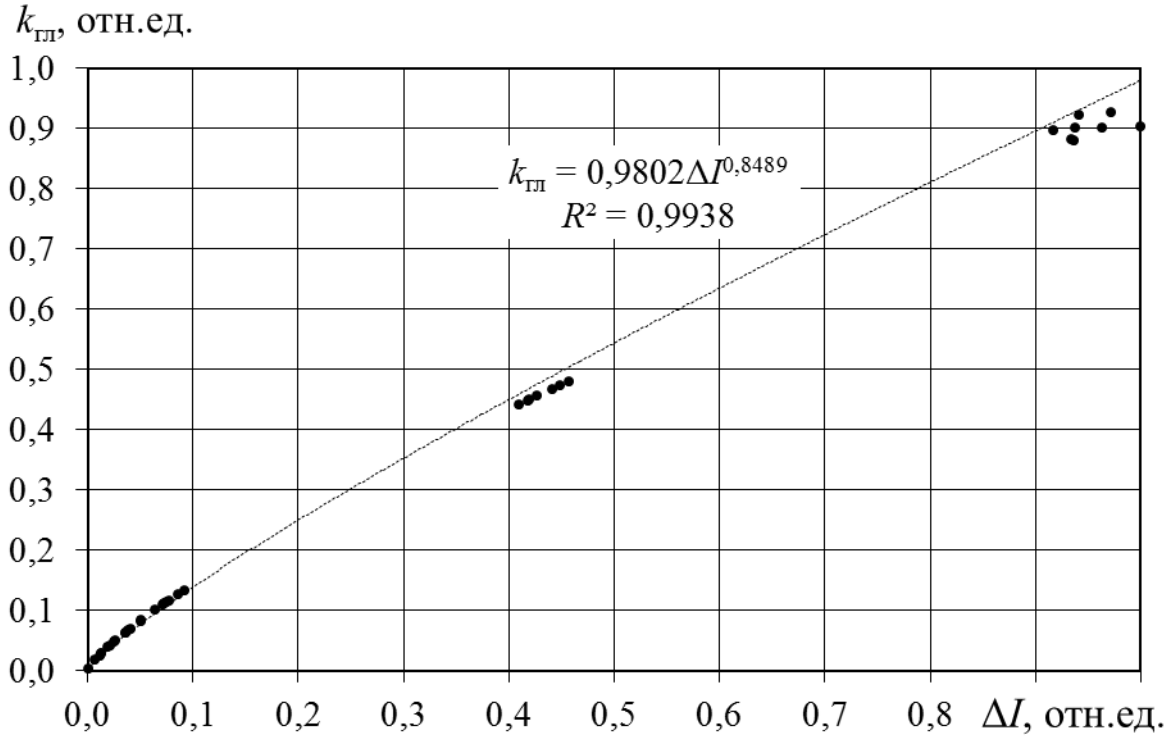


Рис. 2.2. Зависимость коэффициента глинистости $k_{гл}$ от двойного разностного параметра ΔI

Лабораторная работа № 3

Определение линейного коэффициента ослабления гамма-излучения при прохождении через вещество

При прохождении через вещество гамма-излучение теряет свою энергию, постепенно поглощаясь веществом.

Гамма-кванты, обладая нулевой массой покоя, не могут замедляться в среде, поэтому при прохождении сквозь вещество они либо поглощаются, либо рассеиваются (изменяют направление своего движения). Основными процессами, сопровождающими прохождение гамма-излучения через вещество, являются фотоэффект, эффект Комптона и образование электронно-позитронных пар.

Фотоэффект − процесс неупругого взаимодействия гамма-излучения с веществом, при котором падающий фотон поглощается атомом и передает свою энергию одному из электронов, выбивая его из атома. Фотоэффект происходит на связанных электронах (когда энергия связи электрона в атоме сравнима с энергией фотона), поэтому по мере увеличения энергии фотонов вероятность фотоэффекта уменьшается. Фотоэффект является преобладающим механизмом поглощения в области малых энергий гамма-квантов ($E < 0{,}1$ МэВ для алюминия и $E < 0{,}5$ МэВ для свинца).

При более высоких значениях энергий гамма-квантов вероятность фотоэффекта очень мала и основным механизмом их взаимодействия с веществом становится *комптоновское рассеяние* − процесс упругого взаимодействия фотона со свободным электроном (электрон можно считать свободным, если энергия фотона существенно превышает энергию связи электрона в атоме). В результате взаимодействия падающий фотон передает часть энергии электрону и изменяет направление своего движения (рассеивается).

Образование электронно-позитронных пар ($\gamma \rightarrow e^- + e^+$) может происходить при прохождении фотона с энергией $E > 1{,}02$ МэВ (удвоенная энергия покоя электрона) в электрическом поле атомных ядер. При этом фотон исчезает, а вся эго энергия распределяется между образовавшимися электроном и позитроном. Вероятность этого процесса увеличивается с ростом энергии фотона.

В результате перечисленных процессов при прохождении через вещество поток гамма-излучения ослабляется. Электромагнитное излучение характеризуется интенсивностью I , величиной, представляющей собой энергию, переносимую фотонами в единицу времени че-

рез единичную площадку, перпендикулярную направлению распространения излучения.

Уменьшение интенсивности гамма-излучения при прохождении бесконечно тонкого слоя вещества пропорционально толщине этого слоя *dx* и интенсивности падающего излучения *I*:

$$- dI = \mu I\, dx\ , \qquad (3.1)$$

где μ - линейный коэффициент ослабления, зависящий от природы поглощающего вещества и энергии фотонов падающего излучения (табл. 3.1)

Таблица 3.1

E, МэВ	μ , см $^{-1}$					
	свинец	вода	алюминий	железо	графит	воздух
0,10	65,0	0,171	0,455	2,91	0,342	$2{,}00\cdot10^{-4}$
0,15	22,8	0,151	0,371	1,55	0,304	$1{,}76\cdot10^{-4}$
0,20	11,1	0,137	0,328	1,15	0,277	$1{,}59\cdot10^{-4}$
0,30	4,43	0,119	0,280	0,865	0,241	$1{,}38\cdot10^{-4}$
0,40	2,62	0,106	0,249	0,740	0,214	$1{,}23\cdot10^{-4}$
0,50	1,80	0,0966	0,227	0,661	0,196	$1{,}12\cdot10^{-4}$
0,80	0,999	0,0786	0,184	0,526	0,159	$9{,}13\cdot10^{-5}$
1,0	0,798	0,0279	0,165	0,471	0,143	$8{,}21\cdot10^{-5}$
1,5	0,591	0,0575	0,135	0,382	0,117	$6{,}68\cdot1^{-5}$
2,0	0,518	0,0493	0,116	0,334	0,0999	$5{,}74\cdot10^{-5}$
3,0	0,475	0,0396	0,0950	0,284	0,0801	$4{,}63\cdot10^{-5}$

Интегрируя уравнение (3.1), получаем закон ослабления излучения слоем вещества толщиной *x*:

$$I = I_0\, e^{-\mu x}\ , \qquad (3.2)$$

где I_0 и I - интенсивность излучения до и после прохождения слоя вещества соответственно.

Из формулы (3.2) следует, что интенсивность гамма-излучения по мере прохождения слоя вещества толщиной *x* уменьшается по экспоненциальному закону. Быстрота изменения интенсивности определяется коэффициентом поглощения μ (обычно измеряемым в см$^{-1}$). Экспоненциальная зависимость (3.2) строго выполняется для узкого пучка фотонов одинаковой энергии.

Из уравнения (3.2) следует что

$$\mu = \frac{1}{x} \ln \frac{I_0}{I}. \qquad (3.3)$$

Задание

1. Проверить работоспособность радиометра СРП-88 измерением напряжения питания батарей. Собрать установку гамма-просвечивания (рис.3.1). Включить радиометр на прогрев в течение 5 минут.

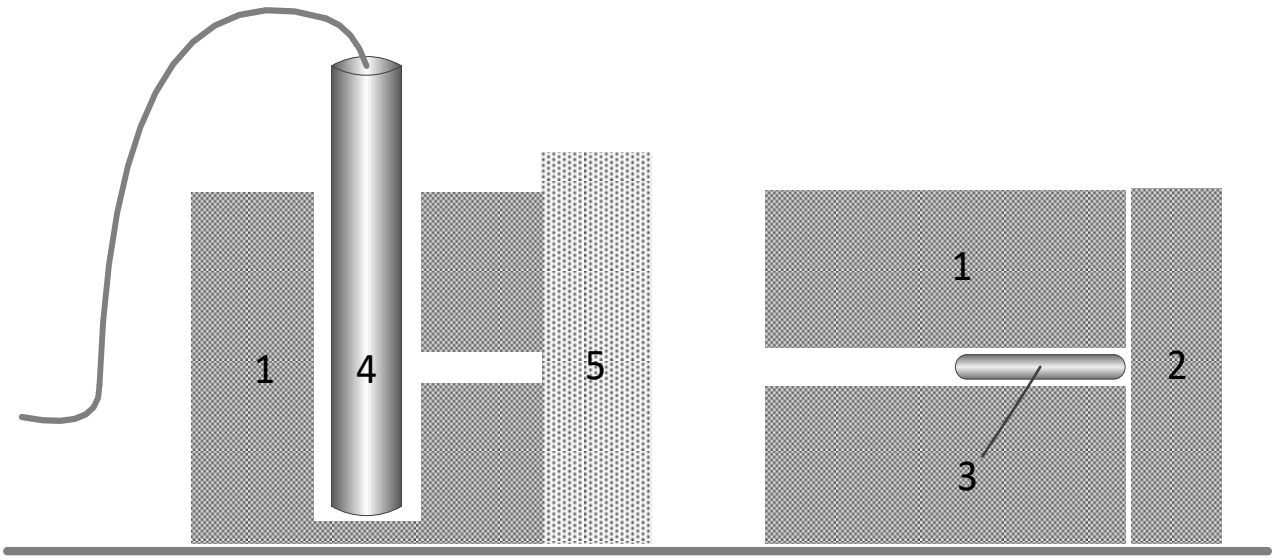


Рис. 3.1. Установка гамма-просвечивания. Обозначения: 1 − свинцовый коллиматор; 2 − свинцовый экран; 3 − источник гамма-излучения; 4 − детектор гамма-излучения; 5 − исследуемый образец

2. Подготовить таблицу для записи результатов измерений:

Экспозиция _____ с $I_ф$ = _____ имп. $I_о$ = _____ имп.			
Горная порода	x, см	I, имп.	μ, см$^{-1}$
1	*2*	*3*	*4*

3. Пятикратно измерить величину натурального фона $I_ф$ в установке гамма-просвечивания и вычислить ее среднее значение. Результат записать в таблицу.

4. Соблюдая правила техники безопасности поместить радиоизотопный источник в свинцовый коллиматор. Отверстие, противоположное направлению к детектору, закрыть свинцовым экраном.

5. Произвести пять измерений величины I_o - интенсивности излучения в отсутствии поглотителя. Вычислить среднее значение и занести в таблицу.

6. Пятикратно измерить интенсивности ослабленного излучения I для каждого выданного образца горной породы, одновременно измеряя толщину поглощающего слоя x в точке просвечивания с помощью штангенциркуля или линейки. Вычислить средние значения I для каждого образца. Результаты занести в таблицу.

7. Вычислить линейный коэффициент ослабления гамма-излучения для каждого образца по формуле:

$$\mu = \frac{1}{x} \ln \frac{I_0 - I_ф}{I - I_ф} \qquad (3.4)$$

8. Сделать выводы о связи плотности образцов горных пород и линейным коэффициентом ослабления гамма-излучения в них.

Лабораторная работа № 4

Исследование связи между пористостью терригенных отложений и рассеянием гамма-квантов в них

При исследовании нефтегазовых месторождений широко применяется плотностной гамма-гамма-каротаж (ГГК-П), который позволяет провести дифференциацию разреза скважин по плотности, а также определить коэффициент пористости пород-коллекторов.

Определение коэффициента пористости плотностным гамма-гамма методом основано на тесной функциональной связи между плотностью породы δ и ее пористостью $k_п$:

$$\delta = (1 - k_п) \cdot \delta_{ск} + k_п \delta_{ж}, \qquad (4.1)$$

где $\delta_{ск}$ и $\delta_ж$ – соответственно плотности минерального скелета и жидкости, насыщающей поры породы, которые находят при лабораторных исследованиях керна.

Плотность пород δ определяют по результатам ГГК-П, который основан на изучении комптоновского рассеяния гамма-квантов в горных породах. Через горную породу пропускают гамма-излучение с энергией E > 0,3 МэВ (когда наиболее вероятным типом взаимодействия гамма-излучения с веществом является комптон-эффект) и регистрируют ослабленное в породе излучение в результате комптоновского рассеяния квантов. По степени ослабления гамма-излучения можно судить о плотности горных пород. Измерительную аппаратуру

градуируют на эталонных образцах с известной плотностью. Современная аппаратура позволяет получать диаграммы ГГК-П, для которых масштаб оцифрован в единицах плотности.

Таким образом, коэффициент пористости пород $k_п$ в разрезе скважин можно найти, используя выражение (4.1):

$$k_п = \frac{\delta_{ск} - \delta}{\delta_{ск} - \delta_{ж}}. \qquad (4.2)$$

Задание

При исследовании скважины получена диаграмма ГГК-П с данными о плотности горных пород разреза. По результатам исследования кернового материала, извлеченного из скважины, получены данные о плотности минерального скелета пород $\delta_{ск}$ и плотности жидкости $\delta_ж$, заполняющей поры.

1. Для заданного преподавателем варианта данных (таблица 4.1) проинтерпретировать диаграмму ГГК-П: используя связь (4.2) получить данные о коэффициенте пористости пород $k_п$ в разрезе скважины. Плотность минерального скелета пород $\delta_{ск}$ принять равной 2,8 г/см^3, а плотность жидкости $\delta_ж$ – 1,1 г/см^3.

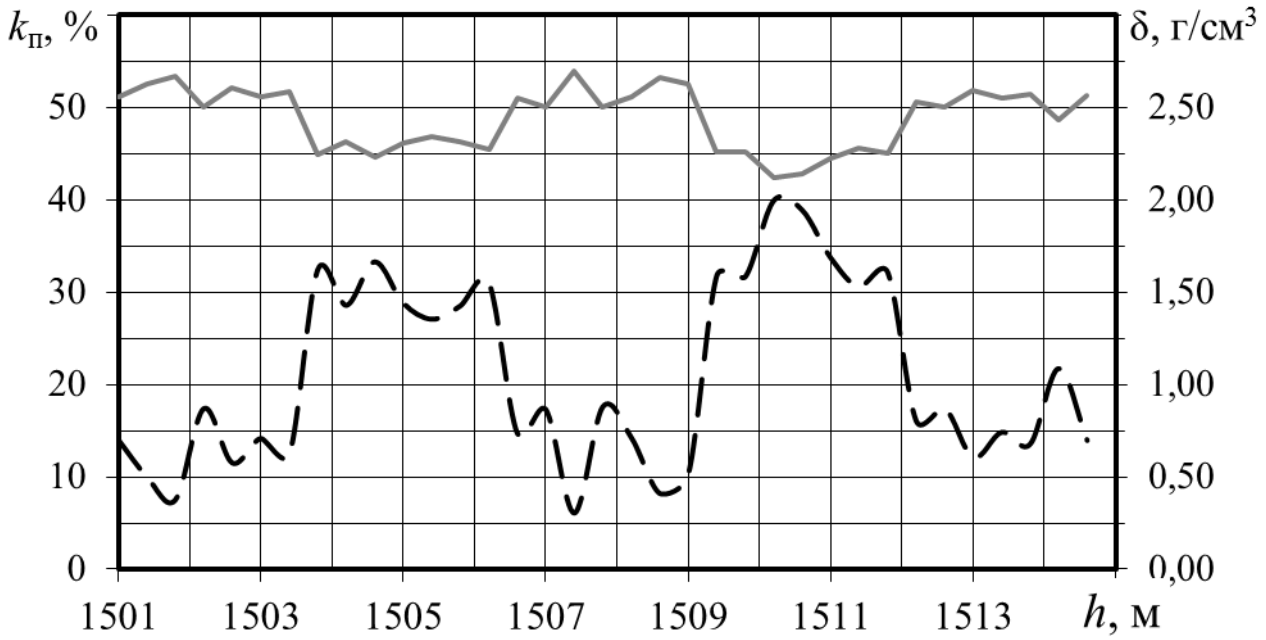


Рис. 4.1. Диаграмма ГГК-П и ее интерпретация

2. Построить диаграмму ГГК-П и результат ее интерпретации (рис.4.1).

3. Выделить коллектора в разрезе скважины. Построить литологическую колонку. Привести условные обозначения.

Таблица 4.1

h, м	*Вариант диаграммы ГГК-П*											
	1	***2***	***3***	***4***	***5***	***6***	***7***	***8***	***9***	***10***	***11***	***12***
	δ, г/см^3											
1501,0	2,64	2,66	2,67	2,67	2,54	2,59	2,70	2,68	2,56	2,52	2,50	2,55
1501,4	2,58	2,54	2,63	2,55	2,65	2,64	2,64	2,65	2,67	2,66	2,69	2,57
1501,8	2,63	2,53	2,52	2,63	2,65	2,66	2,66	2,70	2,51	2,60	2,66	2,54
1502,2	2,57	2,62	2,52	2,70	2,67	2,66	2,55	2,54	2,69	2,54	2,53	2,61
1502,6	2,52	2,61	2,62	2,66	2,67	2,59	2,52	2,67	2,53	2,66	2,66	2,54
1503,0	2,52	2,66	2,52	2,64	2,65	2,54	2,66	2,55	2,69	2,65	2,62	2,61
1503,4	2,56	2,70	2,56	2,54	2,66	2,53	2,56	2,63	2,69	2,58	2,51	2,68
1503,8	2,37	2,36	2,36	2,34	2,32	2,35	2,28	2,36	2,20	2,21	2,38	2,32
1504,2	2,30	2,30	2,27	2,32	2,34	2,37	2,36	2,38	2,33	2,25	2,35	2,32
1504,6	2,38	2,30	2,37	2,37	2,39	2,26	2,26	2,29	2,34	2,20	2,25	2,39
1505,0	2,38	2,26	2,32	2,23	2,37	2,31	2,30	2,30	2,30	2,29	2,21	2,30
1505,4	2,35	2,36	2,28	2,35	2,29	2,29	2,38	2,22	2,23	2,30	2,25	2,38
1505,8	2,37	2,30	2,23	2,32	2,35	2,38	2,35	2,30	2,25	2,36	2,40	2,28
1506,2	2,26	2,33	2,39	2,39	2,31	2,35	2,26	2,24	2,23	2,23	2,21	2,37
1506,6	2,54	2,64	2,51	2,64	2,70	2,55	2,59	2,69	2,54	2,57	2,58	2,51
1507,0	2,52	2,50	2,51	2,70	2,57	2,50	2,56	2,53	2,61	2,50	2,57	2,66
1507,4	2,51	2,62	2,51	2,60	2,62	2,60	2,64	2,69	2,56	2,61	2,55	2,68
1507,8	2,55	2,62	2,58	2,65	2,59	2,60	2,60	2,67	2,67	2,50	2,51	2,61
1508,2	2,52	2,69	2,68	2,68	2,56	2,69	2,58	2,67	2,57	2,60	2,54	2,59
1508,6	2,59	2,64	2,68	2,56	2,61	2,57	2,67	2,51	2,62	2,67	2,66	2,55
1509,0	2,59	2,55	2,60	2,51	2,55	2,56	2,60	2,57	2,69	2,54	2,61	2,59
1509,4	2,11	2,18	2,26	2,11	2,23	2,21	2,29	2,14	2,20	2,10	2,11	2,24
1509,8	2,27	2,24	2,17	2,23	2,19	2,14	2,20	2,16	2,18	2,21	2,18	2,15
1510,2	2,25	2,30	2,27	2,28	2,11	2,17	2,12	2,22	2,29	2,14	2,28	2,23
1510,6	2,18	2,19	2,28	2,11	2,18	2,16	2,13	2,30	2,25	2,11	2,13	2,16
1511,0	2,13	2,12	2,28	2,29	2,27	2,16	2,10	2,26	2,13	2,26	2,18	2,29
1511,4	2,19	2,21	2,26	2,21	2,25	2,24	2,10	2,12	2,24	2,16	2,12	2,15
1511,8	2,13	2,22	2,26	2,27	2,17	2,21	2,29	2,11	2,20	2,25	2,25	2,19
1512,2	2,59	2,59	2,54	2,45	2,53	2,45	2,51	2,75	2,45	2,54	2,45	2,49
1512,6	2,58	2,46	2,41	2,58	2,53	2,54	2,54	2,66	2,45	2,58	2,46	2,47
1513,0	2,43	2,47	2,46	2,56	2,56	2,55	2,49	2,79	2,52	2,51	2,48	2,58
1513,4	2,42	2,45	2,41	2,49	2,42	2,49	2,44	2,64	2,41	2,49	2,56	2,55
1513,8	2,55	2,53	2,58	2,44	2,42	2,54	2,56	2,78	2,41	2,59	2,60	2,51
1514,2	2,55	2,54	2,54	2,48	2,40	2,40	2,41	2,76	2,41	2,56	2,60	2,43
1514,6	2,56	2,59	2,47	2,51	2,58	2,49	2,50	2,60	2,58	2,54	2,57	2,50

Лабораторная работа № 5

Расчет нейтронных параметров горных пород

Нейтронные методы широко применяются на месторождениях нефти, газа и твердых полезных ископаемых для определения коллекторских свойств горных пород, контроля разработки месторождений, элементного анализа горных пород и решения других задач.

Ведущая роль нейтронных методов при исследовании обсаженных скважин нефтяных и газовых месторождений определяется возможностью изучения геологического разреза через стальную обсадную колонну. Такая важная задача, как, например, доразведка месторождений, не может быть решена без применения нейтронных методов.

Большую роль нейтронные методы играют при контроле разработки нефтяных и газовых месторождений. Применение нейтронных методов исследования скважин позволяет повысить достоверность геофизических заключений и, как следствие, сократить сроки и затраты на разведку, применять более экономичные системы разработки месторождений, повысить коэффициент извлечения запасов.

Современный арсенал методов нейтронометрии скважин велик, однако используется он не полностью. Это объясняется сложностью теоретического описания процессов взаимодействия нейтронов с веществом и трудностью экспериментальных исследований.

Поскольку нейтронные характеристики горных пород определяют закономерности распределения нейтронов в горных породах и зависимости показаний нейтронных методов от состава и свойств пород, методики расчета этих характеристик имеют важное значение.

Как правило, эти методики основаны на использовании теории переноса нейтронов в веществе и учете геохимических, петрофизических, структурных особенностей горных пород, а также термодинамических условий их залегания.

В соответствии с особенностями распространения нейтронов в веществе нейтронные параметры делятся на параметры *замедления быстрых нейтронов* и параметры *диффузии тепловых нейтронов*.

***Быстрые нейтроны*.** К параметрам замедления быстрых нейтронов относят

− макроскопическое сечение рассеяния Σ_s,

− длину замедления L_s,

− время замедления $\tau_з$.

Макроскопическое сечение рассеяния быстрых нейтронов Σ_s в

простом веществе равно

$$\Sigma_s = \sigma_{s1} n = \sigma_{s1} \frac{\rho N_A}{M}, \qquad (5.1)$$

где σ_{s1} – микроскопического сечения рассеяния быстрых нейтронов в см^2; n – количество ядер (атомов) в 1 см^3 вещества (плотность ядер); ρ – плотность среды в г/см^3; M – атомная масса в г; N_A – число Авогадро.

Для сред сложного состава

$$\Sigma_s = \sum_i \sigma_{s1i} n_i, \qquad (5.2)$$

где σ_{s1i} - микроскопического сечения рассеяния быстрых нейтронов на ядрах i-го сорта в см^2; n_i - количество ядер (атомов) i-го сорта в 1 см^3 вещества (плотность ядер).

Длину замедления быстрых нейтронов можно рассчитать по формуле

$$L_s = \sqrt{\frac{D_1}{\Sigma_y}}, \qquad (5.3)$$

где D_1 – коэффициент диффузии быстрых нейтронов в см; Σ_y – макроскопическое сечение увода быстрых нейтронов в тепловую группу в см$^{-1}$.

Значения D_1 и Σ_y для среды сложного состава можно найти, используя следующие соотношения:

$$D_1 = \frac{1}{3\Sigma_{tr}} = \frac{1}{3\Sigma_s(1-\overline{\cos\nu_i})} = \frac{1}{3\sum_i n_i \sigma_{s1i}(1-\overline{\cos\nu_i})}, \qquad (5.4)$$

$$\Sigma_y = \frac{\sum_i n_i \sigma_{s1i} \xi_i}{\ln \frac{E_0}{E_т}}, \qquad (5.5)$$

где Σ_{tr} – транспортное макросечение среды; $\overline{\cos\nu_i}$ – средний косинус угла рассеяния быстрых нейтронов на ядрах i-го сорта; ξ_i – средняя логарифмическая потеря энергии на ядрах i-го сорта; E_o – начальная энергия нейтронов (5 МэВ); $E_т$ – энергия тепловых нейтронов (0,01 эВ).

Средний косинус угла рассеяния быстрых нейтронов на ядрах i-го сорта и средняя логарифмическая потеря энергии на ядрах i-го сорта подсчитывается по формулам:

$$\overline{\cos\nu_i} = \frac{2}{3M_i} \quad \text{и} \quad \xi_i = \frac{2}{M_i + 2/3}. \qquad (5.6, 5.7)$$

Транспортное макросечение среды Σ_{tr} связано с транспортным

смещением нейтронов в этой среде λ_{tr} (пространственное смещение нейтрона в среде между двумя последовательными актами рассеяния на ядрах среды, осредненное по всем рассеяниям):

$$\Sigma_{tr} = 1/\lambda_{tr} \quad \text{или} \quad \lambda_{tr} = 1/\Sigma_{tr} . \tag{5.8}$$

Транспортное смещение нейтрона

$$\lambda_{tr} = \lambda_s /(1-\overline{\cos\nu}) , \tag{5.9}$$

где λ_s – среднее расстояние между двумя рассеивающими столкновениями.

$$\lambda_s = 1/\Sigma_s . \tag{5.10}$$

Транспортное макросечение среды Σ_{tr} и макроскопическое сечение рассеяния быстрых нейтронов Σ_s связаны между собой:

$$\Sigma_{tr} = \Sigma_s (1-\overline{\cos\nu}) . \tag{5.11}$$

Время замедления быстрых нейтронов $\tau_з$ можно вычислить следующим образом:

$$\tau_з = \frac{2\lambda_s}{\xi V_т} = \frac{2}{\Sigma_s \xi V_т}, \tag{5.12}$$

где $V_т$ – скорость тепловых нейтронов.

Для среды сложного состава

$$\tau_з = \frac{2}{V_т \sum_i n_i \sigma_{s1i} \xi_i} . \tag{5.13}$$

<u>Тепловые нейтроны</u>. К параметрам диффузии тепловых нейтронов относят:

− макроскопическое сечение поглощения тепловых нейтронов Σ_a,

− длину диффузии тепловых нейтронов L_a,

− время их жизни τ.

Макроскопическое сечение поглощения тепловых нейтронов Σ_a в среде сложного состава определяется микроскопическими сечениями поглощения нейтронов ядрами i-го сорта σ_{ai} и их количеством в 1 см^3 вещества:

$$\Sigma_a = \sum_i \sigma_{ai} n_i . \tag{5.14}$$

Длину диффузии тепловых нейтронов L_a можно вычислить, используя соотношение

$$L_a = \sqrt{D_2 / \Sigma_a} , \tag{5.15}$$

где D_2 – коэффициент диффузии тепловых нейтронов.

Для расчета коэффициента диффузии тепловых нейтронов D_2 в

среде сложного состава необходимо знать микроскопические сечения рассеяния тепловых нейтронов на ядрах *i*-го сорта σ_{s2i}:

$$D_2 = \frac{1}{3\sum_i \sigma_{s2i} n_i (1 - \overline{\cos \nu_i})}. \qquad (5.16)$$

Время жизни тепловых нейтронов τ в среде сложного состава зависит от макроскопического сечения поглощения тепловых нейтронов Σ_a в этой среде и скорости тепловых нейтронов $V_т$:

$$\tau = \frac{1}{V_т \Sigma_a} = \frac{1}{V_т \sum_i n_i \sigma_{ai}}, \qquad (5.17)$$

Задание

1. Согласно указанного (табл. 5.1) варианта рассчитать нейтронные параметры для среды, состоящей из кварцевого песка (SiO_2) и воды (H_2O) с различным содержанием каждого компонента.

2. Построить графики зависимости каждого нейтронного параметра от влажности *W* и плотности ρ среды:

$D_1=f(W)$, $\Sigma_s=f(W)$, $\tau=f(W)$, $L_s=f(W)$, $D_2=f(W)$, $\Sigma_a=f(W)$, $\tau_з=f(W)$, $L_a=f(W)$,
$D_1=f(\rho)$, $\Sigma_s=f(\rho)$, $\tau=f(\rho)$, $L_s=f(\rho)$, $D_2=f(\rho)$, $\Sigma_a=f(\rho)$, $\tau_з=f(\rho)$, $L_a=f(\rho)$.

Пример оформления графиков приведен на рис. 5.1.

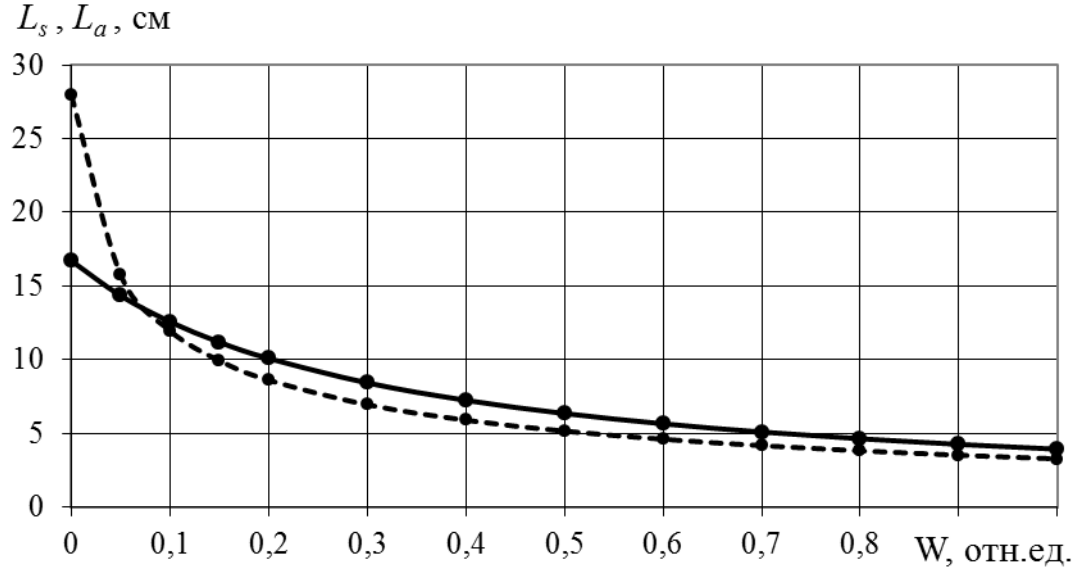


Рис. 5.1. Зависимость длины замедления быстрых нейтронов и длины диффузии тепловых нейтронов от влажности горной породы

3. Сделать выводы о влиянии водосодержания и плотности среды на ее нейтронные параметры.

Таблица 5.1

Состав среды для расчетов

вариант 1	***вариант 2***	***вариант 3***	***вариант 4***
SiO_2	SiO_2	SiO_2	SiO_2
$0,05H_2O+0,95SiO_2$	$0,06H_2O+0,94SiO_2$	$0,07H_2O+0,93SiO_2$	$0,08H_2O+0,92SiO_2$
$0,15H_2O+0,85SiO_2$	$0,16H_2O+0,84SiO_2$	$0,17H_2O+0,83SiO_2$	$0,18H_2O+0,82SiO_2$
$0,25H_2O+0,75SiO_2$	$0,26H_2O+0,74SiO_2$	$0,27H_2O+0,73SiO_2$	$0,28H_2O+0,72SiO_2$
$0,35H_2O+0,65SiO_2$	$0,36H_2O+0,64SiO_2$	$0,37H_2O+0,63SiO_2$	$0,38H_2O+0,62SiO_2$
$0,45H_2O+0,55SiO_2$	$0,46H_2O+0,54SiO_2$	$0,47H_2O+0,53SiO_2$	$0,48H_2O+0,52SiO_2$
$0,55H_2O+0,45SiO_2$	$0,56H_2O+0,44SiO_2$	$0,57H_2O+0,43SiO_2$	$0,58H_2O+0,42SiO_2$
$0,65H_2O+0,35SiO_2$	$0,66H_2O+0,34SiO_2$	$0,67H_2O+0,33SiO_2$	$0,68H_2O+0,32SiO_2$
$0,75H_2O+0,25SiO_2$	$0,76H_2O+0,24SiO_2$	$0,77H_2O+0,23SiO_2$	$0,78H_2O+0,22SiO_2$
$0,85H_2O+0,15SiO_2$	$0,86H_2O+0,14SiO_2$	$0,87H_2O+0,13SiO_2$	$0,88H_2O+0,12SiO_2$
H_2O	H_2O	H_2O	H_2O
вариант 5	***вариант 6***	***вариант 7***	***вариант 8***
SiO_2	SiO_2	SiO_2	SiO_2
$0,09H_2O+0,91SiO_2$	$0,1H_2O+0,9SiO_2$	$0,11H_2O+0,89SiO_2$	$0,12H_2O+0,88SiO_2$
$0,19H_2O+0,81SiO_2$	$0,2H_2O+0,8SiO_2$	$0,21H_2O+0,79SiO_2$	$0,22H_2O+0,78SiO_2$
$0,29H_2O+0,71SiO_2$	$0,3H_2O+0,7SiO_2$	$0,31H_2O+0,69SiO_2$	$0,32H_2O+0,68SiO_2$
$0,39H_2O+0,61SiO_2$	$0,4H_2O+0,6SiO_2$	$0,41H_2O+0,59SiO_2$	$0,42H_2O+0,58SiO_2$
$0,49H_2O+0,51SiO_2$	$0,5H_2O+0,5SiO_2$	$0,51H_2O+0,49SiO_2$	$0,52H_2O+0,48SiO_2$
$0,59H_2O+0,41SiO_2$	$0,6H_2O+0,4SiO_2$	$0,61H_2O+0,39SiO_2$	$0,62H_2O+0,38SiO_2$
$0,69H_2O+0,31SiO_2$	$0,7H_2O+0,3SiO_2$	$0,71H_2O+0,29SiO_2$	$0,72H_2O+0,28SiO_2$
$0,79H_2O+0,21SiO_2$	$0,8H_2O+0,2SiO_2$	$0,81H_2O+0,19SiO_2$	$0,82H_2O+0,18SiO_2$
$0,89H_2O+0,11SiO_2$	$0,9H_2O+0,1SiO_2$	$0,91H_2O+0,09SiO_2$	$0,92H_2O+0,08SiO_2$
H_2O	H_2O	H_2O	H_2O
вариант 9	***вариант 10***	***вариант 11***	***вариант 12***
SiO_2	SiO_2	SiO_2	SiO_2
$0,13H_2O+0,87SiO_2$	$0,14H_2O+0,86SiO_2$	$0,15H_2O+0,85SiO_2$	$0,16H_2O+0,84SiO_2$
$0,23H_2O+0,77SiO_2$	$0,24H_2O+0,76SiO_2$	$0,25H_2O+0,75SiO_2$	$0,26H_2O+0,74SiO_2$
$0,33H_2O+0,67SiO_2$	$0,34H_2O+0,66SiO_2$	$0,35H_2O+0,65SiO_2$	$0,36H_2O+0,64SiO_2$
$0,43H_2O+0,57SiO_2$	$0,44H_2O+0,56SiO_2$	$0,45H_2O+0,55SiO_2$	$0,46H_2O+0,54SiO_2$
$0,53H_2O+0,47SiO_2$	$0,54H_2O+0,46SiO_2$	$0,55H_2O+0,45SiO_2$	$0,56H_2O+0,44SiO_2$
$0,63H_2O+0,37SiO_2$	$0,64H_2O+0,36SiO_2$	$0,65H_2O+0,35SiO_2$	$0,66H_2O+0,34SiO_2$
$0,73H_2O+0,27SiO_2$	$0,74H_2O+0,26SiO_2$	$0,75H_2O+0,25SiO_2$	$0,76H_2O+0,24SiO_2$
$0,83H_2O+0,17SiO_2$	$0,84H_2O+0,16SiO_2$	$0,85H_2O+0,15SiO_2$	$0,86H_2O+0,14SiO_2$
$0,93H_2O+0,07SiO_2$	$0,94H_2O+0,06SiO_2$	$0,95H_2O+0,05SiO_2$	$0,96H_2O+0,04SiO_2$
H_2O	H_2O	H_2O	H_2O

Для удобства расчеты можно вести в таблице приложения *Microsoft Excel* (табл. 5.2).

Расчет плотности ядер *i*-го сорта выполняется по формуле:

$$n_i = \frac{\rho N_A}{M_i}\ , \qquad (5.18)$$

где ρ – плотность среды ; M_i – атомная масса *i*-го элемента в; N_A – число Авогадро ($6{,}02 \cdot 10^{23}$).

Например, для кремнезема (W = 0 %) молекулярная масса равна 60 а.е., плотность равна 2,75 г/см^3. Тогда количество молекул кремнезема в 1 см^3 будет

$$n_{SiO_2} = \frac{2{,}75 \cdot 6{,}02 \cdot 10^{23}}{60} = 2{,}76 \cdot 10^{22}\ \ \frac{\text{молекул}}{\text{см}^3} \qquad (5.19)$$

Так как в молекулу кремнезема входит один атом (ядро) кремния и два атома (ядра) кислорода, то плотность ядер кремния и кислорода соответственно будет

$$n_{\text{Si}} = 2{,}76 \cdot 10^{22}\ \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3} \quad \text{и} \quad n_{\text{O}_2} = 5{,}52 \cdot 10^{22}\ \ \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3},$$

то есть, плотность ядер кислорода в два раза больше.

Для воды (W = 100 %) молекулярная масса равна 18 а.е., плотность равна 1,0 г/см^3. Количество молекул воды в 1 см^3 будет

$$n_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{1{,}0 \cdot 6{,}02 \cdot 10^{23}}{18} = 3{,}34 \cdot 10^{22}\ \ \frac{\text{молекул}}{\text{см}^3}. \qquad (5.20)$$

В молекулу воды входит два ядра водорода и одно ядро кислорода. Поэтому плотность ядер водорода и кислорода будут

$$n_{\text{H}_2} = 6{,}68 \cdot 10^{22}\ \ \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3} \ \text{ и } \ n_{\text{O}} = 3{,}34 \cdot 10^{22}\ \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3}\ . \qquad (5.21)$$

Для промежуточных значений влажности (0 % < W < 100 %) силикатной среды плотность ядер отдельных элементов вычисляется, исходя из объемного содержания влаги и кремнезема в среде. Например, при W = 10 % количество ядер водорода и кислорода будет в десять раз меньше, чем в чистой водной среде (то есть когда H_2O = 100 % и SiO_2 = 0 %):

$$n_{\text{H}_2} = 0{,}668 \cdot 10^{22}\ \ \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3} \ \text{ и } \ n_{\text{O}} = 0{,}334 \cdot 10^{22}\ \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3}\ . \qquad (5.22)$$

Соответственно плотность молекул кремнезема для такой среды будет меньше и составит 90 % от плотности молекул SiO_2 в сплошной силикатной среде (то есть когда H_2O = 0 % и SiO_2 = 100 %):

$$n_{\text{Si}} = 2{,}48 \cdot 10^{22}\ \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3} \quad \text{и} \quad n_{\text{O}_2} = 4{,}97 \cdot 10^{22}\ \ \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3}. \qquad (5.23)$$

Таблица 5.2

Характеристики элементов				Элементы				Для быстрых нейтронов:											
				H_2	O	Si	O_2												
A_i				1	16	28	16												
σ_{s1}, барн				15,00	3,75	2,25	3,75												
ξ_i																			
σ_{s2}, барн				38,00	4,20	1,76	4,20												
σ_a, барн				0,33	0,0003	0,16	0,0003												
1-cos ν																			
Состав	W, %	C, %	ρ, г/см^3	Плотность ядер n_i, ядер/см^3				$n_i \cdot \sigma_{s1i} \cdot (1-\cos\nu_i)$				D_1, см	$n_i \cdot \sigma_{s1i} \cdot \xi_i$				Σ_y, см$^{-1}$	L_s, см
				H_2	O	Si	O_2	H_2	O	Si	O_2		H_2	O	Si	O_2		
SiO_2	0		2,75	0	0	2,76	5,52											
$0.1H_2O+0.9SiO_2$	10		2,48															
…	…		…															
H_2O	100		1,00	6,68	3,34	0	0											
масштаб				10^{22}	10^{22}	10^{22}	10^{22}	10^{-2}	10^{-2}	10^{-2}	10^{-2}		10^{-2}	10^{-2}	10^{-2}	10^{-2}	10^{-2}	

Продолжение таблицы 5.2

Характеристики элементов				Элементы				Для тепловых нейтронов:											
				H_2	O	Si	O_2												
A_i				1	16	28	16												
σ_{s1}, барн				15,00	3,75	2,25	3,75												
ξ_i																			
σ_{s2}, барн				38,00	4,20	1,76	4,20												
σ_a, барн				0,33	0,0003	0,16	0,0003												
1-cos ν																			
Состав	W, %	C, %	ρ, г/см^3	Плотность ядер n_i, ядер/см^3				$n_i \cdot \sigma_{s2i} \cdot (1-\cos\nu_i)$				D_2, см	$n_i \cdot \sigma_{ai}$				Σ_a, см$^{-1}$	L_a, см
				H_2	O	Si	O_2	H_2	O	Si	O_2		H_2	O	Si	O_2		
SiO_2	0		2,75	0	0	2,76	5,52											
$0.1H_2O+0.9SiO_2$	10		2,48															
…	…		…															
H_2O	100		1,00	6,68	3,34	0	0											
масштаб				10^{22}	10^{22}	10^{22}	10^{22}	10^{-2}	10^{-2}	10^{-2}	10^{-2}		10^{-2}	10^{-2}	10^{-2}	10^{-2}	10^{-2}	

Лабораторная работа № 6

Изучение влияния минерализации пластовой воды на нейтронные параметры коллекторов

На показания нейтронных методов каротажа кроме водородосодержания горных пород заметно влияет концентрация элементов с высоким сечением поглощения тепловых нейтронов. В большинстве осадочных пород нефтяных разрезов таким элементом является хлор, содержащийся в пластовых водах, минерализация которых может достигать 250-300 г/л. Микроскопическое сечение захвата тепловых нейтронов ядрами хлора составляет 32,6 барна.

Задание

1. Согласно указанного (табл. 6.1) варианта рассчитать нейтронные параметры для пластовой воды, содержащей хлорид натрия различной концентрации.

Таблица 6.1

Состав пластовой воды

вариант 1	***вариант 2***	***вариант 3***	***вариант 4***
H_2O	H_2O	H_2O	H_2O
$0,99H_2O+0,01NaCl$	$0,98H_2O+0,02NaCl$	$0,97H_2O+0,03NaCl$	$0,96H_2O+0,04NaCl$
$0,94H_2O+0,06NaCl$	$0,93H_2O+0,07NaCl$	$0,92H_2O+0,08NaCl$	$0,91H_2O+0,09NaCl$
$0,89H_2O+0,11NaCl$	$0,88H_2O+0,12NaCl$	$0,87H_2O+0,13NaCl$	$0,86H_2O+0,14NaCl$
$0,84H_2O+0,16NaCl$	$0,83H_2O+0,17NaCl$	$0,82H_2O+0,18NaCl$	$0,81H_2O+0,19NaCl$
$0,79H_2O+0,21NaCl$	$0,78H_2O+0,22NaCl$	$0,77H_2O+0,23NaCl$	$0,76H_2O+0,24NaCl$
$0,74H_2O+0,26NaCl$	$0,73H_2O+0,27NaCl$	$0,72H_2O+0,28NaCl$	$0,71H_2O+0,29NaCl$
вариант 5	***вариант 6***	***вариант 7***	***вариант 8***
H_2O	H_2O	H_2O	H_2O
$0,95H_2O+0,05NaCl$	$0,94H_2O+0,06NaCl$	$0,98H_2O+0,02NaCl$	$0,97H_2O+0,03NaCl$
$0,9H_2O+0,1NaCl$	$0,89H_2O+0,11NaCl$	$0,94H_2O+0,06NaCl$	$0,93H_2O+0,07NaCl$
$0,85H_2O+0,15NaCl$	$0,84H_2O+0,16NaCl$	$0,9H_2O+0,1NaCl$	$0,89H_2O+0,11NaCl$
$0,8H_2O+0,2NaCl$	$0,78H_2O+0,21NaCl$	$0,86H_2O+0,14NaCl$	$0,85H_2O+0,15NaCl$
$0,75H_2O+0,25NaCl$	$0,74H_2O+0,26NaCl$	$0,82H_2O+0,18NaCl$	$0,81H_2O+0,19NaCl$
$0,7H_2O+0,3NaCl$	$0,69H_2O+0,31NaCl$	$0,78H_2O+0,22NaCl$	$0,77H_2O+0,23NaCl$
вариант 9	***вариант 10***	***вариант 11***	***вариант 12***
H_2O	H_2O	H_2O	H_2O
$0,96H_2O+0,04NaCl$	$0,95H_2O+0,05NaCl$	$0,99H_2O+0,01NaCl$	$0,94H_2O+0,06NaCl$
$0,92H_2O+0,08NaCl$	$0,91H_2O+0,09NaCl$	$0,93H_2O+0,07NaCl$	$0,9H_2O+0,1NaCl$
$0,88H_2O+0,12NaCl$	$0,87H_2O+0,13NaCl$	$0,87H_2O+0,13NaCl$	$0,86H_2O+0,14NaCl$
$0,84H_2O+0,16NaCl$	$0,83H_2O+0,17NaCl$	$0,81H_2O+0,19NaCl$	$0,82H_2O+0,18NaCl$
$0,8H_2O+0,2NaCl$	$0,79H_2O+0,21NaCl$	$0,75H_2O+0,25NaCl$	$0,78H_2O+0,22NaCl$
$0,76H_2O+0,24NaCl$	$0,75H_2O+0,25NaCl$	$0,69H_2O+0,31NaCl$	$0,74H_2O+0,26NaCl$

Для удобства расчеты можно вести в таблице приложения *Microsoft Excel* (табл. 6.2). Методика расчета нейтронных параметров любой среды и основные количественные соотношения приведены в *лабораторной работе № 6*.

2. Построить графики зависимости нейтронных параметра от концентрации NaCl в воде: $D_1=f(C)$, $\Sigma_s=f(C)$, $\tau=f(C)$, $L_s=f(C)$, $D_2 = f(C)$, $\Sigma_a = f(C)$, $\tau_з = f(W)$, $L_a=f(C)$. Примеры оформления на рис. 6.1, 6.2.

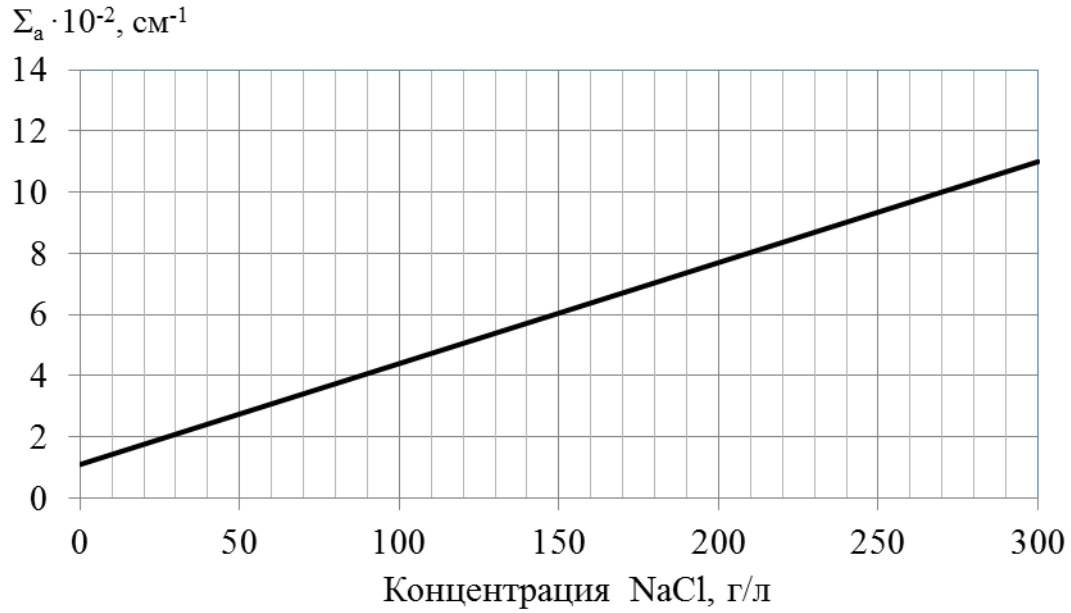


Рис. 6.1. Зависимость макроскопического сечения захвата тепловых нейтронов водным раствором от его минерализации

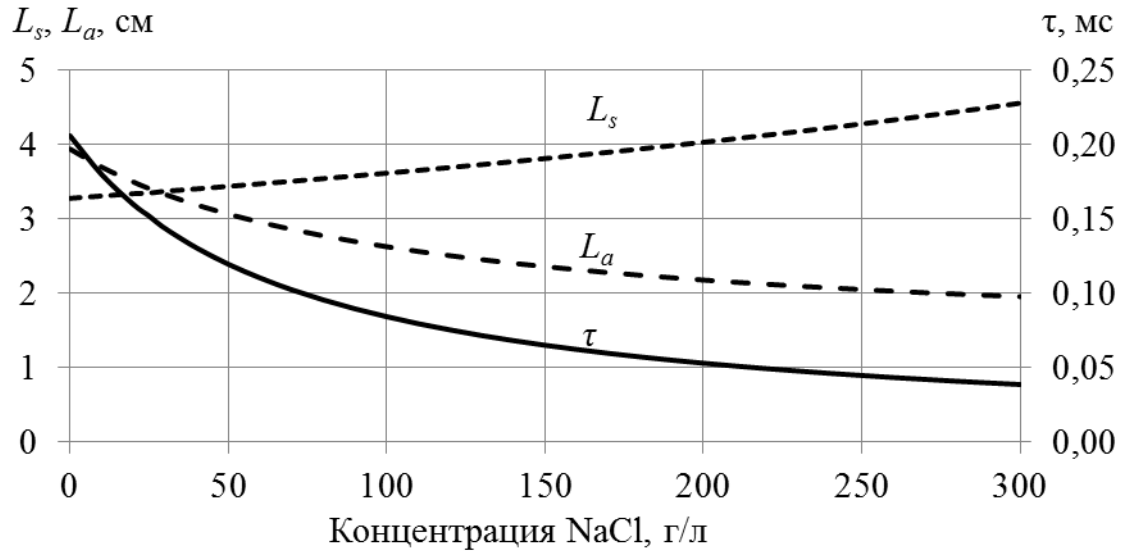


Рис. 6.2. Зависимость длины замедления быстрых нейтронов, длины диффузии и времени жизни тепловых нейтронов в водном растворе от его минерализации

3. Сделать выводы о влиянии концентрации NaCl в воде на ее нейтронные параметры. На какие нейтронные параметры минерализация пластовой воды сказывается более всего?

Таблица 6.2

Характеристики элементов				Элементы				Для быстрых нейтронов:											
				H_2	O	Na	Cl												
A_i				1,00	16,00	23	35												
σ_{s1}, барн				15,00	3,75	4,1	1,5												
ξ_i																			
σ_{s2}, барн				38,00	4,20	4	16												
σ_a, барн				0,33	0,0003	0,515	32,6												
1-cos ν																			
Состав	W, %	C, %	ρ, г/см^3	Плотность ядер n_i, ядер/см^3				$n_i \cdot \sigma_{s1i} \cdot (1-\cos\nu_i)$				D_1, см	$n_i \cdot \sigma_{s1i} \cdot \xi_i$				Σ_y, см$^{-1}$	L_s, см
				H_2	O	Na	Cl	H_2	O	Na	Cl		H_2	O	Na	Cl		
H_2O		0	1	0	0	2,76	5,52											
$0,99H_2O*0,01NaCl$		1	1,01															
…		…	…															
NaCl		100	2,16	6,68	3,34	0	0											
масштаб				10^{22}	10^{22}	10^{22}	10^{22}	10^{-2}	10^{-2}	10^{-2}	10^{-2}		10^{-2}	10^{-2}	10^{-2}	10^{-2}	10^{-2}	

Продолжение таблицы 6.2

Характеристики элементов				Элементы				Для тепловых нейтронов:											
				H_2	O	Na	Cl												
A_i				1,00	16,00	23	35												
σ_{s1}, барн				15,00	3,75	4,1	1,5												
ξ_i																			
σ_{s2}, барн				38,00	4,20	4	16												
σ_a, барн				0,33	0,0003	0,515	32,6												
1-cos ν																			
Состав	W, %	C, %	ρ, г/см^3	Плотность ядер n_i, ядер/см^3				$n_i \cdot \sigma_{s2i} \cdot (1-\cos\nu_i)$				D_2, см	$n_i \cdot \sigma_{ai}$				Σ_a, см$^{-1}$	L_a, см
				H_2	O	Na	Cl	H_2	O	Na	Cl		H_2	O	Na	Cl		
H_2O		0	1	0	0	2,76	5,52											
$0,99H_2O*0,01NaCl$		1	1,01															
…		…	…															
NaCl		100	2,16	6,68	3,34	0	0											
масштаб				10^{22}	10^{22}	10^{22}	10^{22}	10^{-2}	10^{-2}	10^{-2}	10^{-2}		10^{-2}	10^{-2}	10^{-2}	10^{-2}	10^{-2}	

Лабораторная работа № 7

Изучение пористости горных пород по данным ядерно-магнитных исследований керна

Несмотря на существенное расширение в последние годы комплекса геофизических исследования скважин и усовершенствование методики интерпретации результатов, эффективность методов промысловой геофизики при выделении коллекторов в разрезе скважин, оценке их коллекторских свойств и насыщающего их флюида в отдельных случаях окапывается недостаточно высокой. В значительной мере это объясняется тем, что геофизическими методами коллекторы выделяются по косвенным признакам, в то время как прямой признак коллектора — наличие в поровом пространстве свободного флюида — этими методами непосредственно не устанавливается.

Ядерно-магнитный каротаж (ЯМК) — геофизический метод исследования скважин, который позволяет непосредственно обнаруживать свободные флюиды в поровом пространстве пласта и оценивать их относительный объем.

Метод основан на использовании ядерно-магнитных эффектов, в частности, эффектов свободной прецессии ядер водорода в поле Земли, которые наблюдаются в условиях, когда молекулы воды, нефти или газа не закреплены на стенках пор, то есть могут перемещаться в поровом пространстве.

Ядерный магнитный резонанс является одним из методов квантовой радиофизики. В его основе лежит наблюдение эффектов, вызванных взаимодействием ядер, обладающих магнитным моментом, с окружающими их микрочастицами при воздействии на всю систему постоянного и переменного магнитных полей.

Ядерный магнитный резонанс (ЯМР) наблюдается у ядер, имеющих механический (*p)* и магнитный (μ) моменты. Ядро, обладающее механическим моментом (спином), можно рассматривать как намагниченный волчок (рис. 7.1а). В постоянном внешнем магнитном поле на ядро, обладающее магнитным моментом, действует пара сил, стремящаяся расположить момент параллельно этому полю. В то же время вследствие наличия механического момента ядро, подобно волчку, будет прецессировать вокруг направления этого поля с частотой ω_o, пропорциональной напряженности поля H_o и называемой ларморовой частотой:

$$\overrightarrow{\omega_0} = \gamma \cdot \overrightarrow{H_0} \ , \qquad (7.1)$$

где $\gamma = \mu / p$ — гиромагнитное отношение ядра.

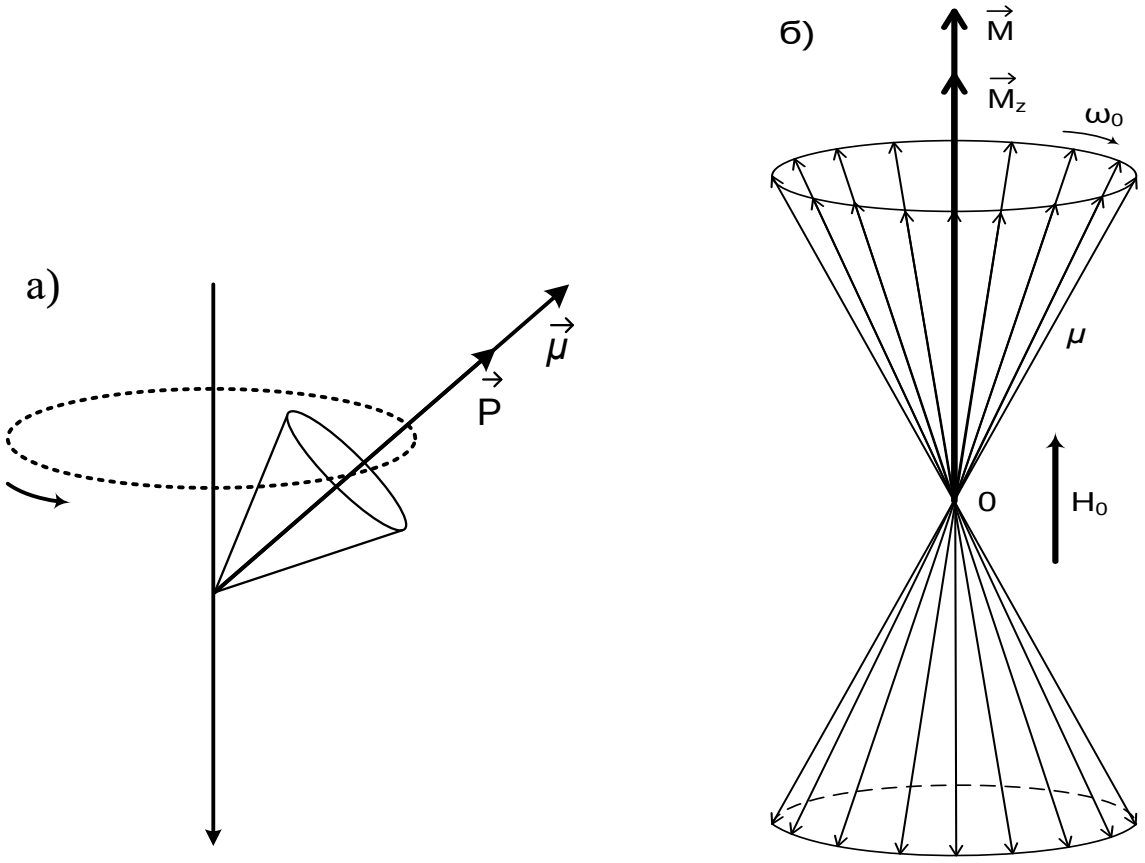


Рис. 7.1. Схема возникновения ядерной намагниченности: а) изображение прецессирующего магнитного момента ядра; б) изображение прецессирующих магнитных моментов ансамбля ядер и продольной составляющей вектора ядерной намагниченности M_z в поле H_0.

В действительности ЯМР наблюдается не для единичного ядра, а для большой совокупности ядер. При этом поведение совокупности ядер, обладающих магнитным и механическим моментами, существенно отличается от поведения отдельно взятого ядра, так как в этом случае существенную роль играет взаимодействие спинов ядер друг с другом (спин-спиновое взаимодействие) и с окружающей средой, или решеткой (спин-решеточное взаимодействие).

При ЯМР исследованиях нефтегазовых коллекторов горные породы подвергают воздействию высокочастотного магнитного поля, частота которого равна резонансной частоте ядер водорода, входящего в состав пластовых флюидов. Создают короткие импульсы высокочастотного магнитного поля, переводящие систему ядер водорода в возбужденное состояние, происходит их намагничивание. После окончания высокочастотного импульса ядра водорода переходят в

основное состояние, происходит их релаксация. На рис. 7.2 приведено схематичное устройство ЯМР-приборов.

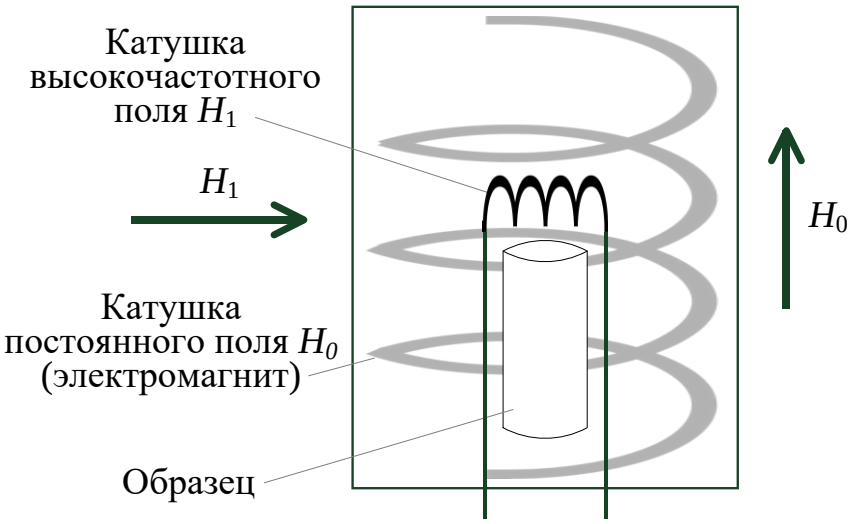


Рис. 7.2. Устройство ЯМР-приборов

Намагниченность образца M_1 в направлении, параллельном линиям поля H_0, возрастает по закону:

$$M_1=M_0\cdot[1-\exp(-t/T_1)], \qquad (7.2)$$

где T_1 – время продольной (спин-решеточной) релаксации (интервал времени, за который будет намагничено 63 % ядер).

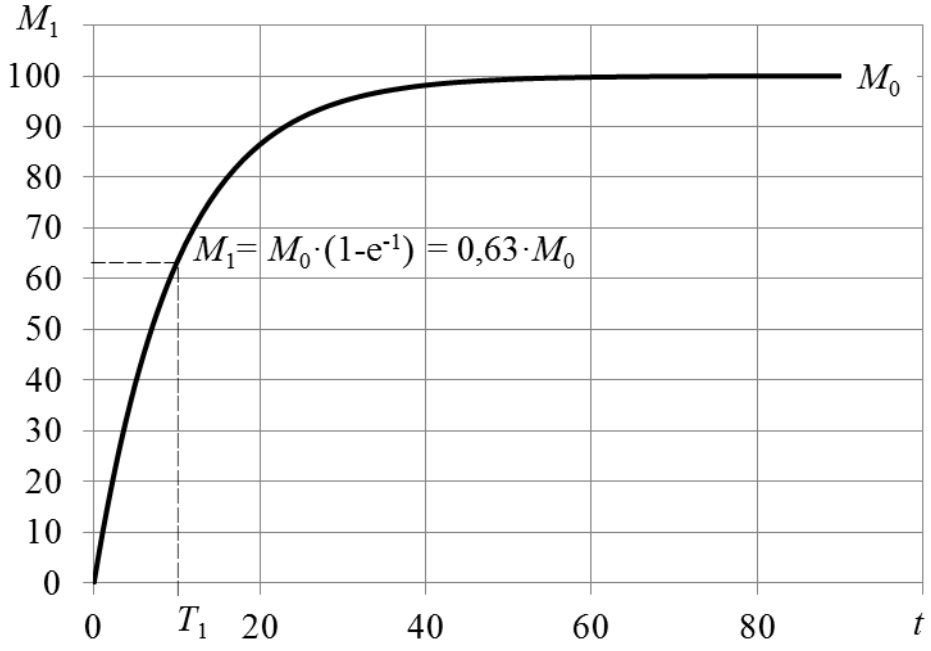


Рис. 7.3. Продольная (спин-решеточная) релаксация

Намагниченность образца M_2 в направлении, перпендикулярном линиям поля H_0 (и параллельном линиям высокочастотного поля H_1)

убывает по закону:

$$M_2 = M_0 \cdot \exp(-t/T_2) \qquad (7.3)$$

где T_2 – время поперечной (спин-спиновой) релаксации (интервал времени, за который намагниченность уменьшится на 63 % от исходного уровня).

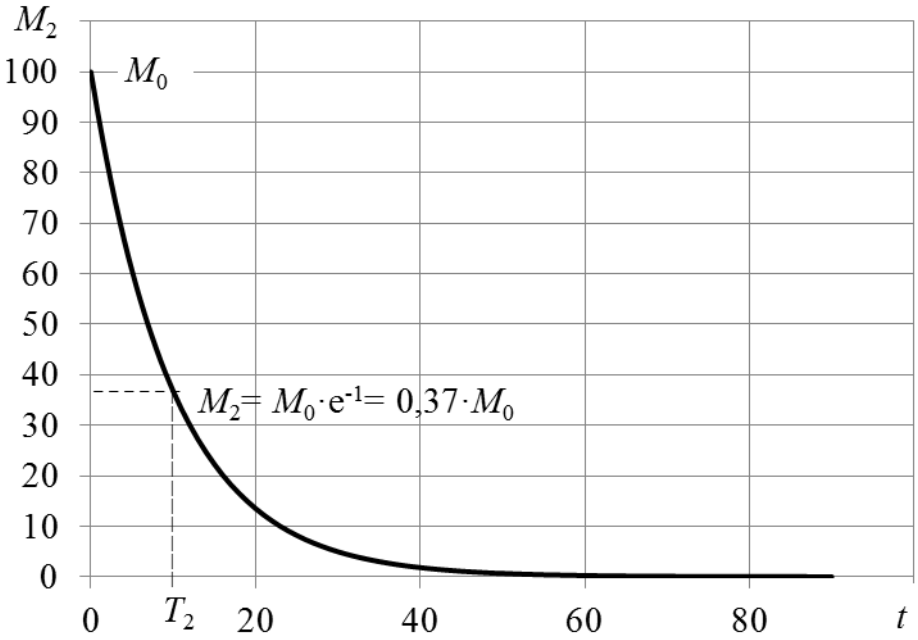


Рис. 7.4. Поперечная (спин-спиновая) релаксация

В геофизической практике при ЯМР-исследованиях определяют величину амплитуды сигнала и его затухание. Величина амплитуды сигнала при ЯМР пропорциональна числу ядер водорода и калибруется таким образом, чтобы определить значения пористости независимо от литологии. Однако наибольший интерес у петрофизиков вызывает величина затухания сигнала ЯМР в течение каждого цикла измерений, так как это затухание связано с подвижностью водородосодержащих молекул флюида.

Регистрируемый сигнал при ЯМР-исследованиях образует так называемую *релаксационную кривую* (рис.7.5), а характеристическое время затухания амплитуды сигнала и есть время поперечной релаксации T_2.

Для правильного применения метода ЯМР при петрофизической интерпретации, исключительно важным является понимание природы релаксации сигнала в поровых флюидах. Так, известны три механизма ЯМР-релаксации, которые влияют на времена релаксации T_1 или T_2, а именно:

- *поверхностная релаксация*, вызванная поверхностью зерен породы,

- *диффузионная релаксация*, вызванная молекулярной диффузией в магнитных полях,

- *объемная релаксация* вследствие процессов, происходящих в самом наполняющем поры флюиде.



Рис. 7.5. Аппаратурная релаксационная кривая. Отдельные точки - полевые данные, сплошная кривая - их осреднение. Эхо-сигналы записаны со временем между сигналами 1 мсек.

Все три процесса действуют одновременно и, следовательно, времена T_1 и T_2 поровых флюидов выражаются как

$$1/T_{2tot} = 1/T_{2S} + 1/T_{2D} + 1/T_{2B}, \qquad (7.4)$$

где T_{2S} - поверхностная релаксация, T_{2D} - диффузионная релаксация и T_{2B} - объемная релаксация.

Относительный вклад каждого из механизмов зависит от типа флюида в порах (вода, нефть или газ), размера пор, силы поверхностной релаксации и смачиваемости поверхности породы.

В общем случае для гидрофильного коллектора установлено следующее:

- время T_2 для пластовой воды определяется, в основном, T_{2S};

- на время T_2 для высоковязкой нефти основное влияние оказывает T_{2B};

- время T_2 для нефтей средней вязкости и легких разностей - комбинация T_{2B} и T_{2D}, и также зависит от величины вязкости;

- время T_2 для газа определяется в основном T_{2D}.

*Поверхностная релаксация***.** Молекулы флюидов находятся в постоянном броуновском движении и диффундируют в поровом пространстве, соприкасаясь с поверхностью зерен породы несколько раз в течение одного цикла измерений ЯМР. Исследования показали, что для большинства пород наибольшее влияние на T_1 и T_2 оказывает поверхностная релаксация. Способность поверхности зерен влиять на протоны называется поверхностной релаксируемостью. Поверхности зерен не одинаково эффективны в релаксации протонов водорода. Так, например, песчаники почти в три раза более эффективны в релаксации поровой воды, чем карбонаты.

Размер пор также играет важную роль в поверхностной релаксации. Скорость релаксации зависит от того, как часто протоны могут соударяться с поверхностью, а это в свою очередь зависит от величины отношения площади поверхности пор к объему – S/V (рис.7.6). Столкновения происходят менее часто в крупных порах, имеющих небольшие величины отношения S/V, и где времена релаксации сравнительно длительные. Аналогично, небольшие поры имеют большие значения отношения S/V и короткие времена релаксации.

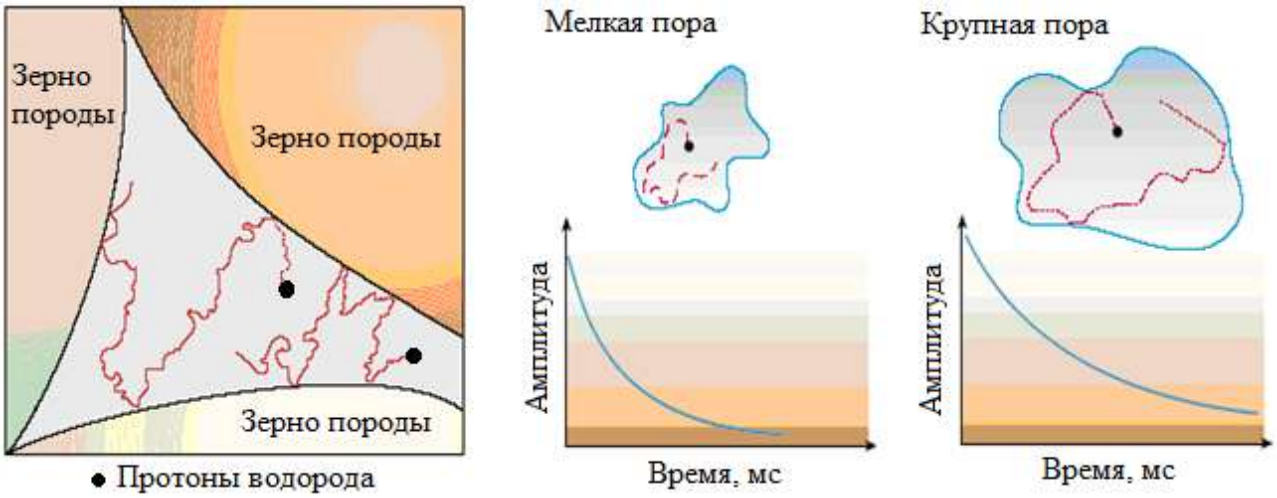


Рис. 7.6. Поверхностная релаксация.

Распределение пор по размерам характеризуется определенным значением отношения S/V. Полная намагниченность определяется суммарным сигналом отдельных пор. Суммарный объем всех пор эквивалентен объему флюида в породе, т.е. пористости. Таким образом,

полный сигнал пропорционален пористости, а общее затухание, отражающее распределение пор по размерам, является суммарным результатом отдельных затуханий. Измерения пористости и распределения пор по размерам являются ключевыми составляющими при интерпретации данных ЯМК.

Диффузионная релаксация. Газы, легкие нефти, вода и некоторые нефти средней вязкости обладают значительной диффузионной релаксацией.

Физические свойства флюидов, такие как вязкость и молекулярный состав влияют на коэффициент диффузии. На него также оказывают влияния параметры окружающей среды — температура и давление.

Коэффициенты диффузии газа, нефти и воды возрастают с увеличением температуры (т.к. при увеличении температуры снижается вязкость флюидов). Коэффициент диффузии газа снижается при возрастании давления, поскольку при этом возрастает его плотность. Коэффициенты диффузии нефтей меняются в широких пределах, поскольку нефти весьма разнятся по молекулярному составу, и, следовательно, по вязкости.

Объемная релаксация. Объемная релаксация является свойством собственной релаксации флюида и зависит от его физических свойств, таких как вязкость и химический состав. На объемную релаксацию флюида влияют такие параметры окружающей среды, как температура и давление.

Релаксацией общего объема флюида часто можно пренебречь, но она становится значимой, когда вода находится в порах очень большого размера, где протоны водорода редко соприкасаются с поверхностью, как, например, в кавернозных карбонатах. Объемная релаксация также значительна в случаях присутствия углеводородов. Углеводородная фаза не контактирует с поверхностью пор, и потому не может быть релаксирована механизмом поверхностной релаксации. Кроме того, повышенная вязкость флюида уменьшает время объемной релаксации. Содержание в буровом растворе ионов Cr, Mn, Fe, Ni или иных парамагнитных ионов также влияет на время объемной релаксации.

Основными измеряемыми параметрами при ЯМР-исследованиях являются релаксационная кривая, отражающая затухание намагниченности порового флюида в породе по времени поперечной релаксации T_2 и амплитуда сигнала, соответствующая времени начала измерения ($t_{\text{нач}} = 0$) релаксационной кривой.

Амплитуда сигнала, отражающая число резонирующих ядер, пропорциональна объемному водородосодержанию. Поскольку известна плотность содержания ядер водорода в воде, то данные ЯМР пересчитывают непосредственно в кажущуюся водонасыщенную пористость.

Пористость по ЯМР не зависит от состава матрицы, т.е. она определяется только флюидами, находящимися в порах. Релаксация ядер, относящихся к твердой фазе, происходит очень быстро и не вносит вклад в регистрируемый сигнал, поэтому свойства матрицы породы не оказывают влияние на пористость, измеренную ЯМР-приборами, и, соответственно, не требуется калибровка на литологию коллектора.

Затухание сигнала определяется тремя параллельно проходящими процессами релаксации: поверхностной релаксации (основной механизм), диффузионной и объемной, каждая из которых контролируется комплексом петрофизических характеристик.

Релаксация намагниченности определяется не только свойствами флюида, находящегося в порах горных пород, но также размером и свойствами поверхности этих пор. Скорость релаксации будет тем больше, чем меньше размер пор.

На рис. 7.7 представлены сигналы ЯМР от пор различных размеров. Из графиков видно, что малым размерам пор соответствует быстрое затухание сигнала ЯМР, а большим порам – медленное затухание.

В реальной горной породе могут присутствовать поры произвольных размеров и в самых разнообразных пропорциях. Результирующий сигнал, регистрируемый прибором, представляет собой сложную суперпозицию различающихся по временам релаксации компонент, каждая из которых соответствует группам пор разного размера. Релаксация жидкости, насыщающей пористую среду, происходит с разной скоростью в зависимости от того каковы размеры пор, свойства поверхности породы и вязкость жидкости. Поры разных размеров вносят разный вклад в общий сигнал. Вклад каждой поры в общий сигнал прямо пропорционален ее объему.

Распределение времен релаксации является мерой распределения размеров пор – нового петрофизического параметра. В результате интерпретации времен релаксации и их распределений можно получить такие петрофизические параметры как проницаемость, динамическая (эффективная) пористость и остаточная водонасыщенность.

Другие возможные приложения включают в себя построение кривых капиллярного давления, определение типа углеводородов и дополнительную информацию при проведении фациального анализа.

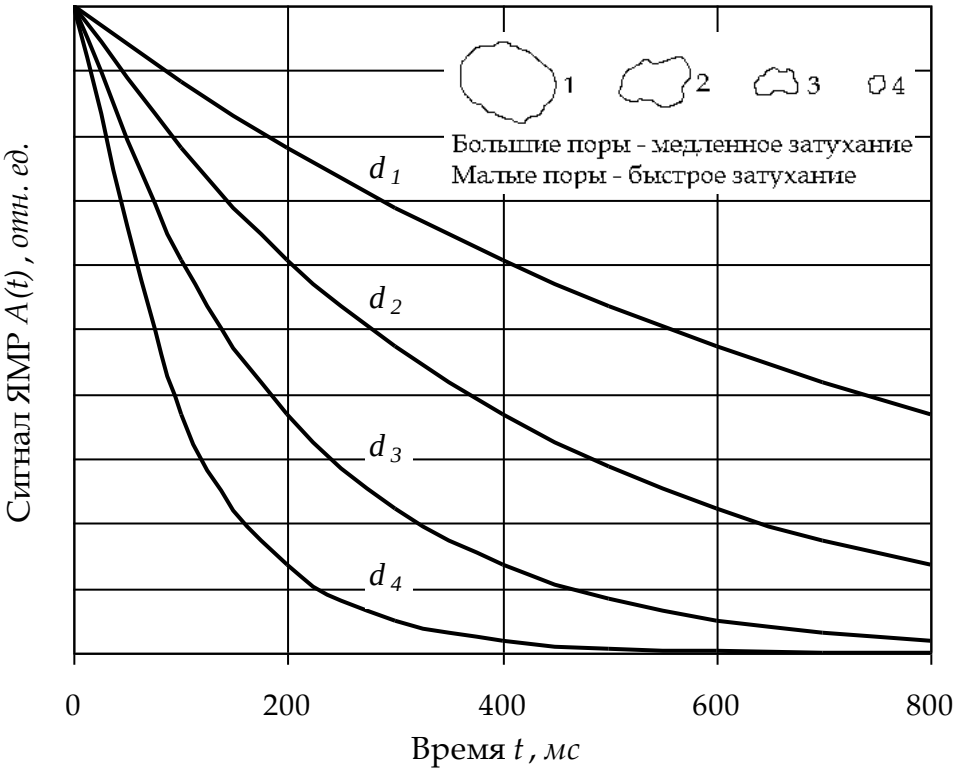


Рис. 7.7. Сигнал ЯМР от пор различных размеров ($d_1 > d_2 > d_3 > d_4$).

Таким образом, эффект ЯМР чувствителен к таким важным петрофизическим характеристикам, как емкость (распределение пористости по размерам пор и на этой основе - различные типы пористости), фильтрация (через распределение пористости по размерам пор), насыщенность и состав флюидов (на основе коэффициента диффузии). Наилучшие возможности ЯМР имеет для определения характеристик емкости, поскольку эффекты поверхностной релаксации при изучении горных пород являются основными в формировании релаксационной кривой, а амплитуда характеризует водородосодержание флюида. Поэтому в рамках интерпретационной модели пористости и проводится основная обработка данных ЯМК.

Определение характеристик разреза по ЯМР включает три стандартные процедуры: получение исходной релаксационной кривой; геофизическую обработку кривой с получением спектров; определение компонент емкости, фильтрации, флюидонасыщенности (рис. 7.8).

Технология обработки результатов ЯМК сводится к следующему.

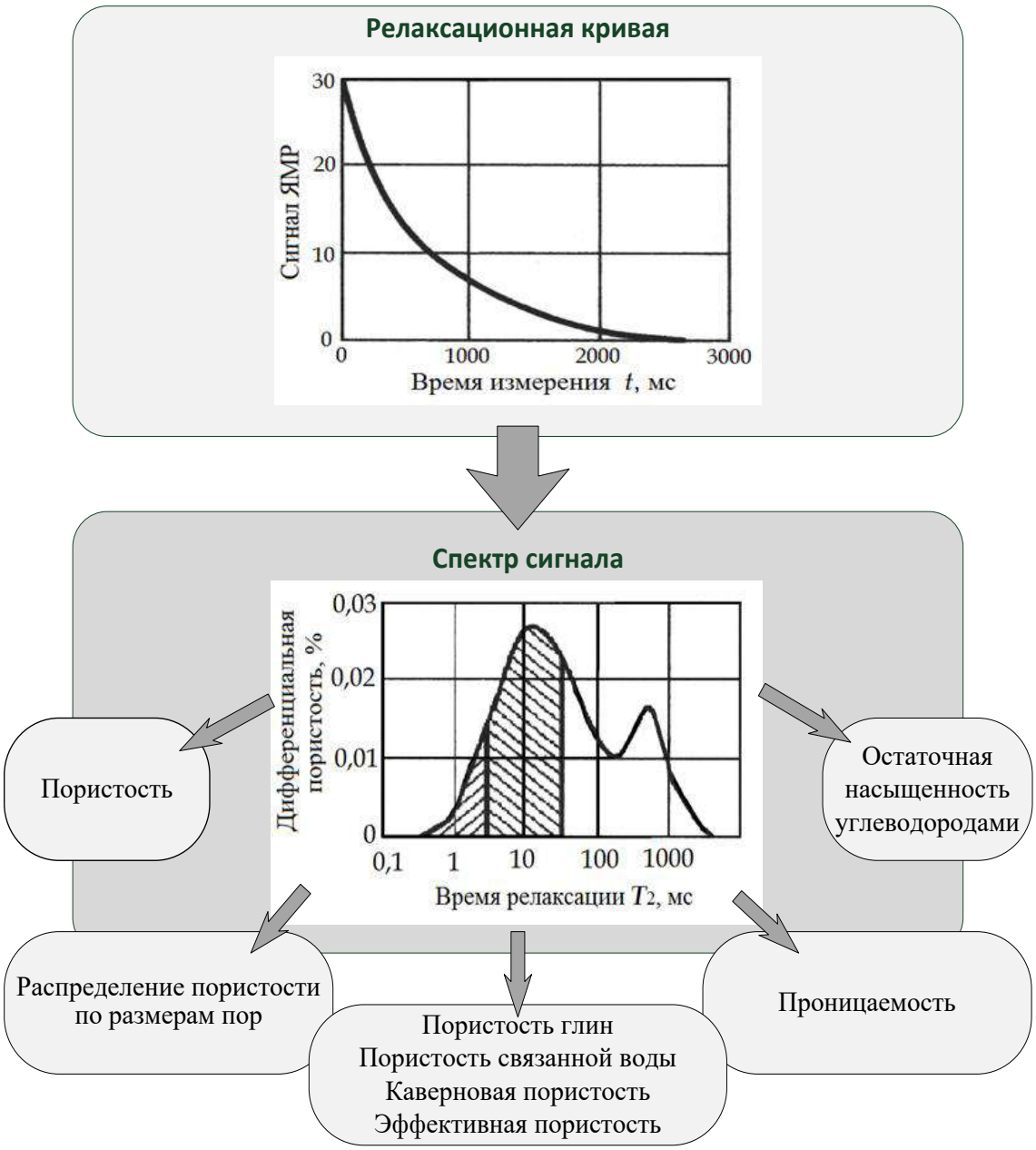


Рис.7.8. Обработка данных ЯМК

Так как поровые коллекторы, как правило, содержат набор пор разного размера и нередко насыщены более чем одним типом флюидов, то измеренный сигнал ЯМР не характеризуется единым значением T_2, а представляет собой распределение времен релаксации, которое описывается уравнением:

$$A(t) = \sum A_i e^{-\frac{t}{T_{2i}}} \qquad (7.5)$$

где A_i – амплитуда i –ой компоненты поперечной релаксации; T_{2i} – время поперечной релаксации i –ой компоненты.

Величины A_i пропорциональны объему флюида в порах соответствующего размера (с временами релаксации T_{2i}), а их сумма пропорциональна общей пористости. Для того что бы определить значение пористости, проводится калибровка: измерение сигнала ЯМР для среды, полностью состоящей из флюида. Обычно для этого используется калибровочная емкость, полностью заполненная дистиллированной водой.

Как было сказано выше, записанный сигнал представлен сложным распределением T_2. Одним из самых важных шагов при обработке данных ЯМР является выделение отдельных релаксационных компонент и определение распределения времени релаксации, которое обуславливает наблюдаемое затухание намагниченности пластовых флюидов.

При обработке данных ЯМР может быть использован мультиэкспоненциальный анализ [2]: сигнал ЯМР представляется в виде суммы нескольких экспонент с разными амплитудами и временами релаксации.

$$A(t) = \phi_1 \cdot e^{-\frac{t}{T_{2,1}}} + \phi_2 \cdot e^{-\frac{t}{T_{2,2}}} + \ldots \qquad (7.6)$$

Существует много математических алгоритмов для определения искомых релаксационных компонент, дающих близкие результаты при корректно заданных начальных условиях. Как правило, это различные модификации классического метода Гаусса-Ньютона для решения задач нелинейной регрессии с помощью метода наименьших квадратов. Результатом является дифференциальный спектр времен релаксации (рис 7.9).

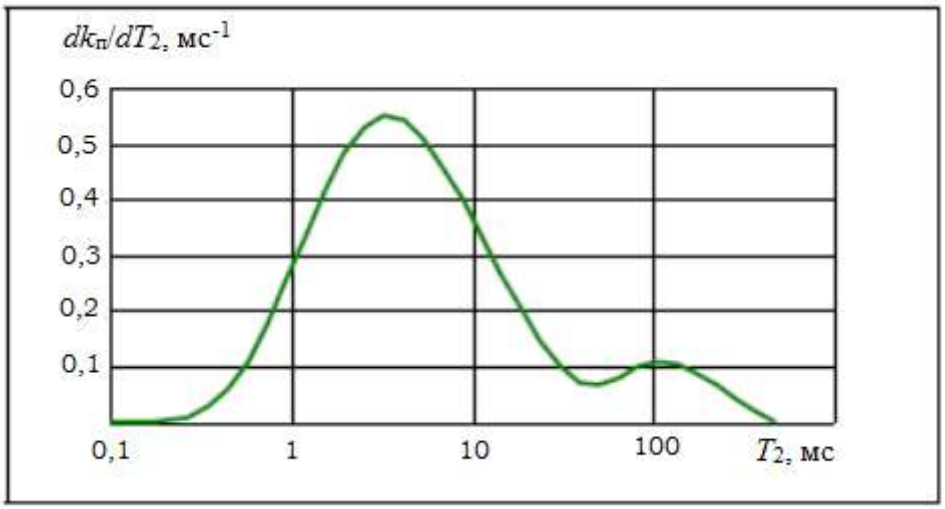


Рис. 7.9. Дифференциальный спектр

Затем, интегрированием дифференциального спектра, определяется интегральный спектр (рис. 7.10). Обычно этот спектр используется для определения пористости и разделения ее на составляющие методом отсечек. Но интегральный спектр хоть и отражает распределение пористости по временам релаксации, но неудобен для отображения на планшете (диаграмме ФЕС).

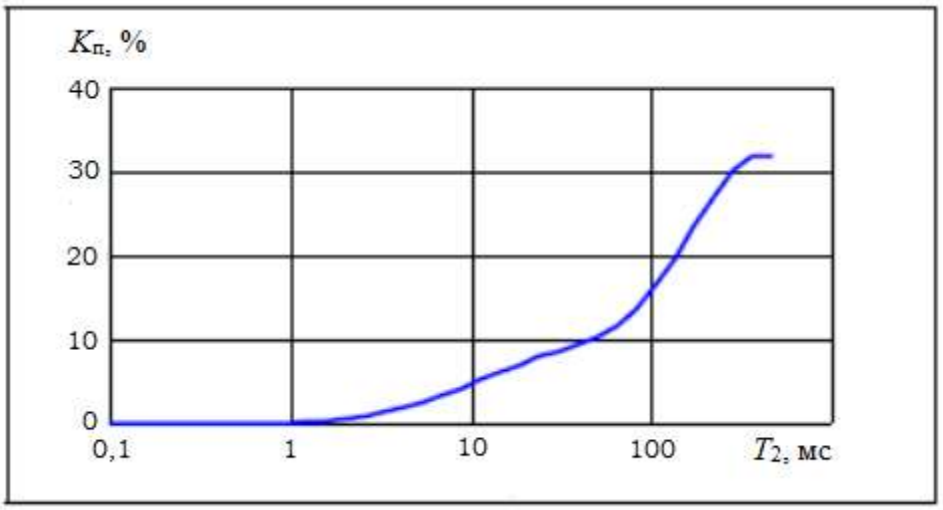


Рис. 7.10. Интегральный спектр

Для большей наглядности дифференциальный спектр пересчитывается в парциальный спектр (рис. 7.11). В этом случае дифференциальные спектры разбивают на фиксированное количество интервалов. Затем интегрированием определяется часть пористости, соответствующая каждой из полученных частей. Ордината соответствующей точки парциального спектра равна пористости, приходящейся на данный участок дифференциального спектра. Таким образом, полученный спектр напрямую показывает распределение пористости по временам релаксации.

Также может быть реализовано общепринятое представление распределения пористости по временам релаксации в виде бинов, при котором спектр разбивается по временам релаксации на части, равные степеням двойки – 2, 4, 8, 16 мс и так далее до 2048 мс. Затем находятся площади этих частей, т.е. соответствующая им пористость и выносится на планшет в виде объемной модели. Сумма бинов равна общей пористости. Спектр, построенный по бинам, является разновидностью парциальных спектров. Такая форма представления может быть удобна для быстрой оценки длины спектра.

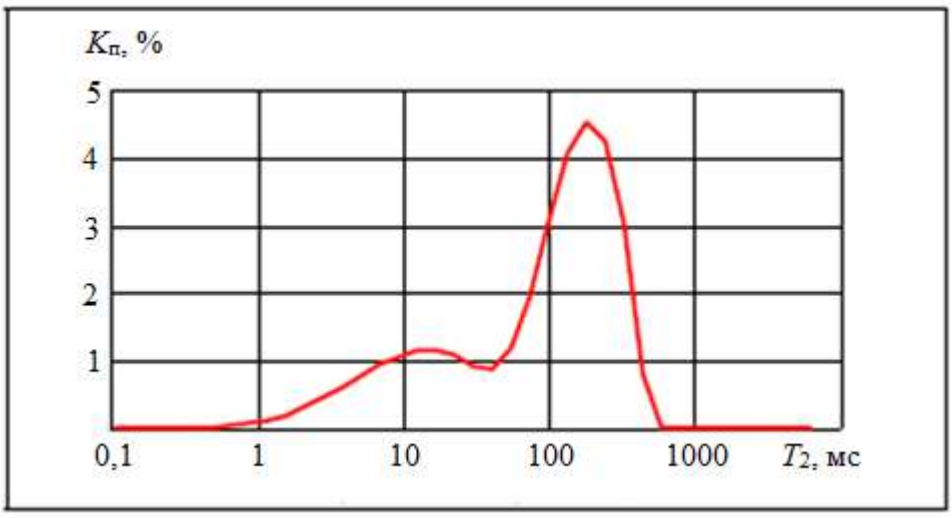


Рис. 7.11. Парциальный спектр

Определение общей пористости по данным ядерного магнитного резонанса не представляет затруднений. Согласно физическим основам метода вся площадь под кривой полученного распределения времен релаксации пропорциональна полной пористости. Чтобы получать распределение T_2 сразу в единицах пористости, аппаратуру перед началом измерений калибруют.

Определять составляющие пористости можно с использованием граничных значений. Многочисленные лабораторные исследования показали, что по кривой распределения T_2 можно устанавливать граничное значение времени релаксации путем сопоставления этого распределения с данными, получаемыми при вытеснении свободной воды из образца [7, 9]. На основании экспериментальных данных, сопоставленных с кривыми ртутного вытеснения, принято считать, что свободная вода полностью вытесняется при давлении 0,7 МПа. Максимальное время поперечной релаксации, наблюдаемое на кривой распределения T_2 после вытеснения воды при этом давлении, принимается за граничное значение $T_{2гр}$ [8]. Величину граничного значения также принято называть отсечкой («cutoff»).

В таблице 7.1 приведены граничные значения времен релаксации для воды, находящейся в порах разного размера.

Таблица 7.1

Граничные значения T_2, мс	Пористость
0 ÷ 3	поры глин
3 ÷ 33	поры с капиллярно-связанной водой
> 33	эффективная пористость
> 750	каверновая пористость

Указанные граничные значения используются при интерпретации данных ЯМК, однако в некоторых случаях эти величины могут быть скорректированы по результатам лабораторных исследований образцов горных пород из конкретной части разреза.

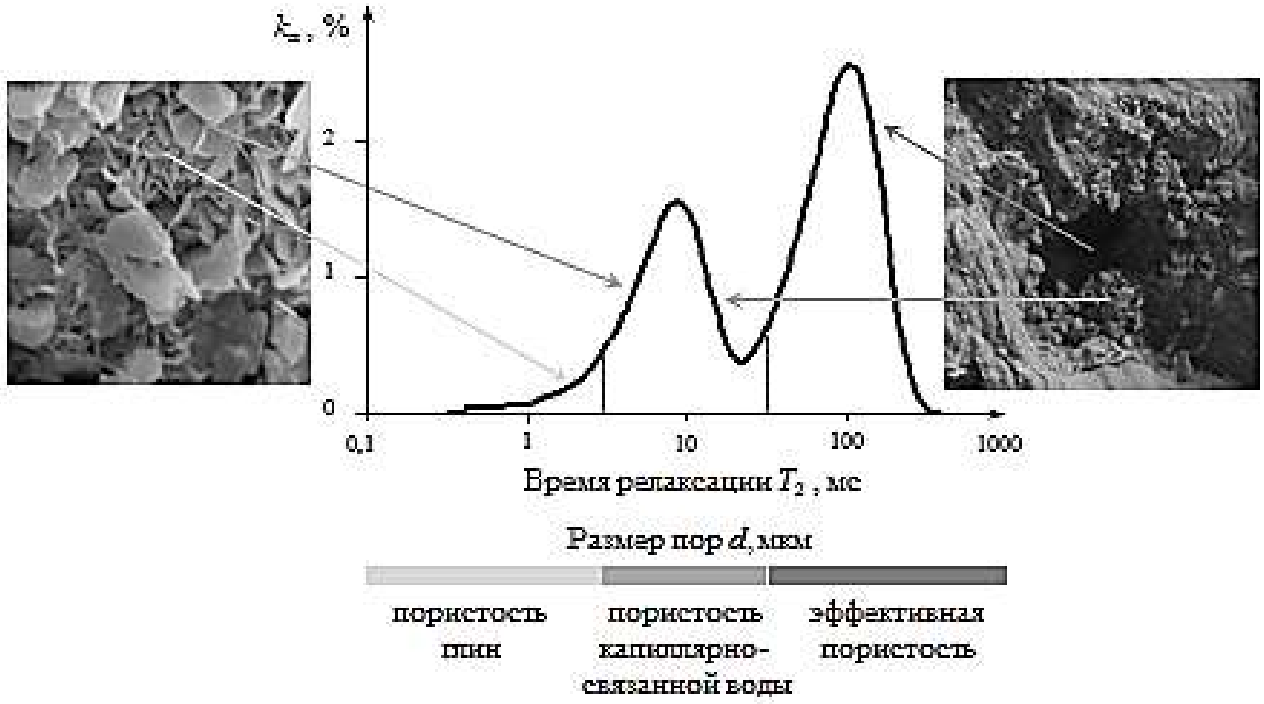


Рис. 7.9. Петрографическая и петрофизическая информативность спектров ЯМК

Таким образом, современные ЯМР-исследования позволяют в общем случае выходить на оценку коэффициента общей пористости $K_{\text{п}}$, а по характеристикам зарегистрированной релаксационной кривой оценивать структуру порового пространства породы в целом и связанные с ней дифференциальные характеристики емкости (эффективная, капиллярно-связанная и др.) и фильтрации. При этом такие оценки возможны для различных типов разрезов нефтегазовых скважин.

Задание

1. Согласно указанного (табл. 7.2) варианта построить дифференциальный спектр сигнала ЯМР для образца керна терригенной породы, как показано на рис. 7.12.
2. Пересчитайте дифференциальный спектр в парциальный.

а) значения $dK_{\text{п}i}/dT_{2i}$ на дифференциальном спектре умножьте на коэффициенты логарифмического масштабирования l_i:

Таблица 7.2

T_2, мс	$dk_п/dT_2$, мс$^{-1}$											
	вариант											
	1	***2***	***3***	***4***	***5***	***6***	***7***	***8***	***9***	***10***	***11***	***12***
0,1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,2	0,035	0,035	0,030	0,030	0,016	0,012	0,006	0,033	0,006	0,006	0,006	0,006
0,3	0,300	0,258	0,110	0,080	0,063	0,044	0,009	0,092	0,009	0,019	0,019	0,019
0,4	0,446	0,407	0,191	0,145	0,127	0,087	0,013	0,168	0,013	0,077	0,035	0,048
0,5	0,511	0,487	0,248	0,186	0,183	0,126	0,019	0,230	0,019	0,172	0,051	0,097
0,6	0,550	0,521	0,277	0,205	0,230	0,136	0,024	0,276	0,024	0,237	0,070	0,176
0,7	0,559	0,533	0,291	0,220	0,255	0,152	0,033	0,312	0,027	0,280	0,098	0,292
0,8	0,565	0,543	0,304	0,229	0,271	0,157	0,047	0,344	0,036	0,330	0,120	0,376
0,9	0,565	0,548	0,316	0,240	0,285	0,155	0,056	0,385	0,048	0,370	0,146	0,415
1	0,561	0,549	0,322	0,245	0,303	0,154	0,063	0,414	0,063	0,400	0,166	0,449
2	0,471	0,471	0,332	0,255	0,326	0,100	0,149	0,470	0,166	0,470	0,201	0,473
3	0,368	0,368	0,311	0,245	0,294	0,145	0,235	0,418	0,235	0,423	0,193	0,456
4	0,283	0,283	0,262	0,229	0,229	0,265	0,298	0,265	0,298	0,353	0,166	0,378
5	0,213	0,213	0,213	0,200	0,172	0,299	0,299	0,196	0,332	0,281	0,129	0,212
6	0,164	0,164	0,164	0,157	0,137	0,266	0,280	0,147	0,359	0,208	0,111	0,128
7	0,125	0,125	0,125	0,125	0,110	0,170	0,233	0,110	0,378	0,171	0,087	0,087
8	0,102	0,102	0,102	0,095	0,095	0,107	0,197	0,095	0,391	0,142	0,076	0,066
9	0,082	0,082	0,082	0,082	0,082	0,082	0,142	0,082	0,405	0,121	0,067	0,053
10	0,077	0,077	0,069	0,069	0,069	0,069	0,116	0,069	0,419	0,093	0,055	0,035
20	0,108	0,068	0,068	0,068	0,094	0,065	0,065	0,065	0,464	0,058	0,031	0,031
30	0,196	0,103	0,149	0,149	0,183	0,123	0,095	0,090	0,464	0,043	0,054	0,054
40	0,227	0,144	0,253	0,295	0,336	0,375	0,296	0,107	0,450	0,038	0,124	0,093
50	0,227	0,164	0,352	0,399	0,424	0,455	0,441	0,117	0,432	0,032	0,254	0,125
60	0,212	0,172	0,378	0,442	0,467	0,453	0,466	0,119	0,408	0,028	0,359	0,141
70	0,197	0,170	0,377	0,446	0,470	0,420	0,472	0,121	0,374	0,024	0,413	0,151
80	0,172	0,154	0,355	0,401	0,436	0,260	0,472	0,116	0,345	0,018	0,429	0,156
90	0,151	0,131	0,250	0,250	0,371	0,154	0,469	0,107	0,297	0,017	0,429	0,157
100	0,120	0,108	0,170	0,170	0,288	0,093	0,459	0,093	0,257	0,014	0,428	0,157
200	0,030	0,022	0,022	0,022	0,062	0,029	0,062	0,041	0,062	0,009	0,248	0,110
300	0,010	0,010	0,010	0,010	0,022	0,016	0,016	0,022	0,016	0,005	0,082	0,052
400	0,001	0,007	0,007	0,007	0,015	0,010	0,010	0,015	0,010	0,005	0,029	0,021
500	0,000	0,003	0,003	0,003	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,004	0,014	0,009
600	0,001	0,001	0,001	0,001	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,009	0,000
700	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,000
800	0,000	0,000	0,000	0,000	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,000
900	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Q, мс$^{-1}$	1512											

$$s_i = \frac{dK_{пi}}{dT_{2i}} \cdot l_i, \qquad (7.7)$$

где l_i=1 в интервале T_2 от 0,1 до 1 мс, l_i=10 в интервале от 1 до 10 мс, l_i=100 в интервале от 10 до 100 мс и l_i=1000 в интервале от 100 до 1000 мс.

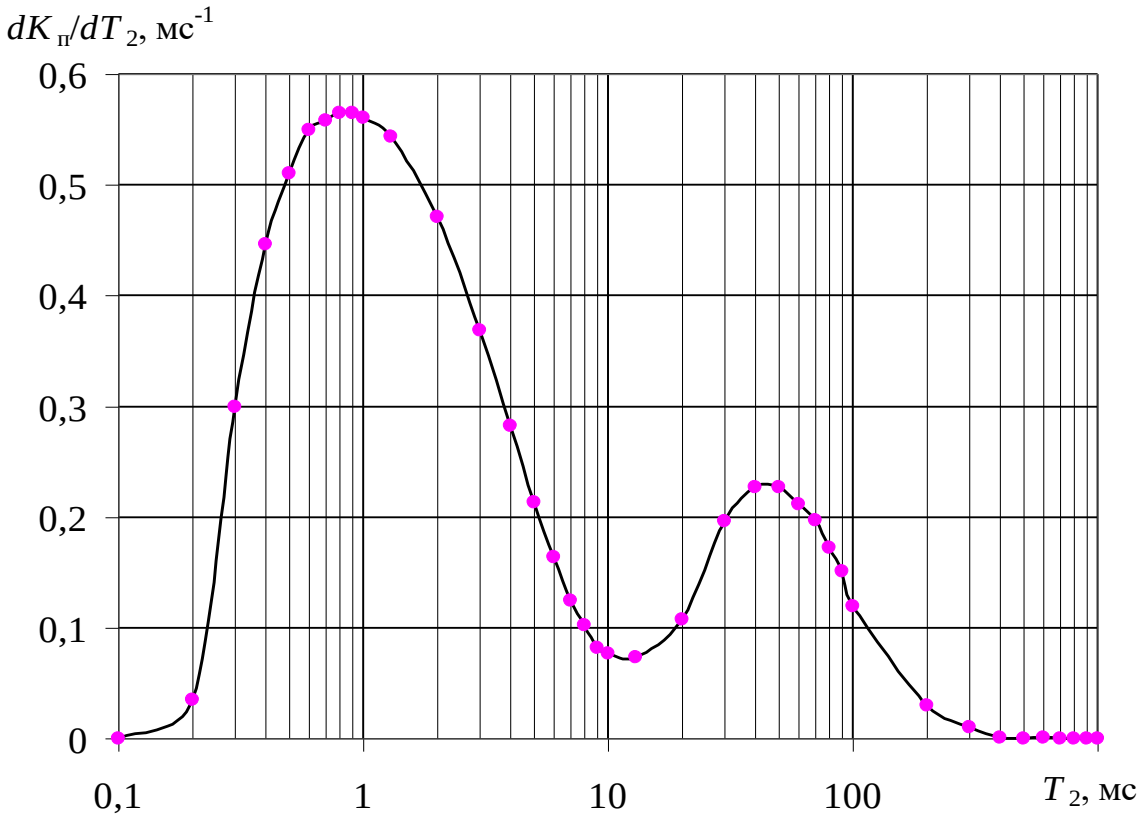


Рис. 7.12. Дифференциальный спектр

б) Просуммируйте все значения s_i, получив площадь спектра:

$$S = \sum_{T_{2i}} s_i \qquad (7.8)$$

в) Перейдите к значениям пористости, используя данные калибровки Q, выполненной для чистой воды:

$$K_{пi} = \frac{s_i}{Q} \cdot 100\% \qquad (7.9)$$

3. Постройте парциальный спектр, как показано на рис. 7.13.
4. Вычислите общую пористость образца керна:

$$K_п = \frac{S}{Q} \cdot 100\% \quad , \quad \text{либо} \quad K_п = \sum_{T_{2i}} K_{пi} \qquad (7.10, 7.11)$$

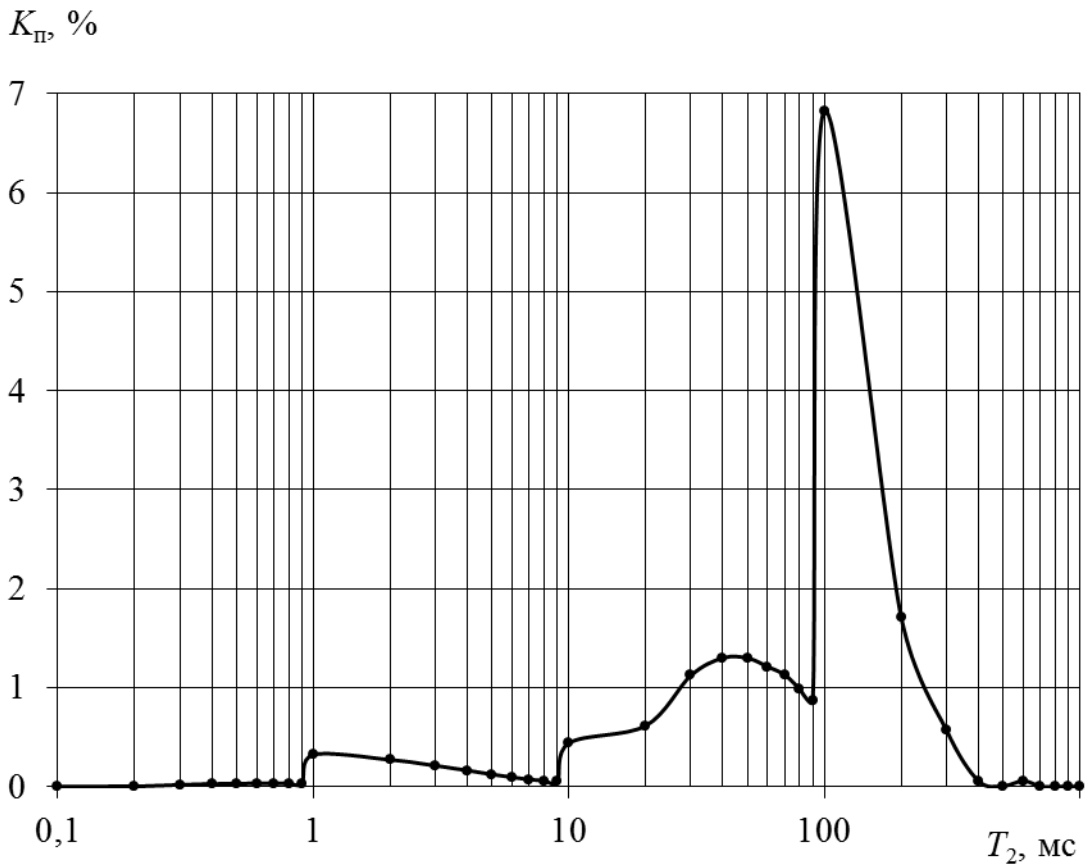


Рис. 7.13. Парциальный спектр

5. Вычислите пористость, приходящуюся на глины, капиллярно-связанную воду. Определите эффективную и каверновую пористость образца. Для этого воспользуйтесь установленными граничными значениями времен релаксации T_2 в порах разного размера (табл. 7.1).

Пористость, соответствующую глинам, можно вычислить так:

$$K_п^{гл} = \sum_{T_2=0мс}^{T_2=3мс} K_{пi} . \qquad (7.12)$$

Пористость, соответствующая капиллярно-связанной воде:

$$K_п^{гл} = \sum_{T_2=3мс}^{T_2=33мс} K_{пi} . \qquad (7.13)$$

Эффективная пористость:

$$K_п^{гл} = \sum_{T_2=33мс}^{T_2=1000мс} K_{пi} . \qquad (7.14)$$

Каверновая пористость:

$$K_{\text{п}}^{\text{гл}} = \sum_{T_2=750\text{мс}}^{T_2=1000\text{мс}} K_{\text{п}i} \,. \qquad (7.15)$$

6. Сделайте вывод о том, какая пористость преобладает в образце – пористость глин, пористость капиллярно-связанной воды, либо эффективная пористость. Присутствует ли в образце каверновая пористость?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Александрова Ж.Н.* Петрофизика коллекторов: Учебное пособие. – Екатеринбург: изд-во УГГУ, 2006. – 153 с.

2. *Аксельрод С.М., Неретин В.Д.* Ядерный магнитный резонанс в нефтегазовой геологии и геофизике. - М.: Недра, 1990. - 192 с.

3. *Добрынин В. М., Вендельштейн Б. Ю., Кожевников Д. А.* Петрофизика (физика горных пород) – М.: «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2004. – 368 с.

4. *Дахнов В.Н.* Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефте-газонасыщения горных пород. – М.: Недра, 1985. - 310 с.

5. Интерпретация результатов геофизических исследований нефтяных и газовых скважин: Справочник. Под ред. *В.М. Добрынина*. – М.: Недра, 1988. - 476 с.

6. *Кобранова В.Н.* Петрофизика. – М.: Недра, 1986. – 392 с.

7. *Chang D., Vinegar H.J., Morriss C., Straley C*. Effective Porosity, Producible Fluid, and Permeability in Carbonates from NMR Logging // The Log Analyst. 1997. Vol.38, №.2, P.60 - 72. (50)

8. Straley C., Rossini D., Vinegar H., Tutunjian P., Morriss C. Core Analysis By Low-Field NMR // The Log Analyst. 1997. Vol.38, №2. P.84-94. (74)

9. *Straley C., Morriss C.E., Kenyon W.E., Howard J.J.* NMR in Partially Saturated Rocks Laboratory Insights on Free Fluid Index and Comparison with Borehole Logs // The Log Analyst. 1995. January-February, P.40-56. (75)

Учебное издание

Александрова Жанна Николаевна

ПРАКТИКУМ ПО ПЕТРОФИЗИКЕ

Руководство по выполнению практических работ
по дисциплине «Петрофизика» для студентов
специализации «Геофизические методы исследования скважин»
специальности 21.05.03 − «Технология геологической разведки»
очной и заочной формы обучения

Часть 2

Редактор _____
Компьютерная верстка автора

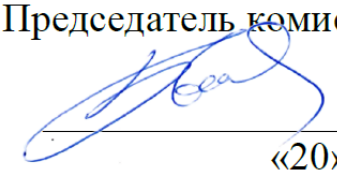
Подписано в печать ___ . ___ . 2018 г.
Бумага писчая. Формат 60 х 84 1/16.
Гарнитура Times New Roman. Печать на ризографе.
Печ. л. _____. Уч.-изд. л. _____. Тираж 100. Заказ _____

Издательство УГГУ
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30
Уральский государственный горный университет
Отпечатано с оригинал-макета
в лаборатории множительной техники УГГУ

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО«Уральский государственный горный университет»

ОДОБРЕНО
методической комиссией
факультета геологии и геофизики
Председатель комиссии



_____ В. И. Бондарев
«20» марта 2020 г.

Г. С. Возженников, Ю. В. Белышев

РАДИОМЕТРИЯ
И
ЯДЕРНАЯ ГЕОФИЗИКА

Екатеринбург – 2020

Ядерные методы в разведочной геофизике

Радиометрия и ядерная геофизика – научные дисциплины, входящие составными разделами в современную область знаний среди наук о земле – «разведочную геофизику».

В отличие от «большой геофизики», которая имеет отношение к физическим процессам глобальных масштабов, протекающим в околоземном пространстве или на значительных глубинах внутри Земли, – ***объектом*** исследований разведочной геофизики является земная кора и скрытые в ней минеральные ресурсы.

Предметом исследований разведочной геофизики являются физические поля, в особенности их деформации (аномалии), вызываемые присутствием в природных средах объектов, отличающихся по физическим свойствам от вмещающих пород.

Радиометрия объединяет в своем составе методы, основанные на изучении *естественной* радиоактивности природных сред, а ***ядерная геофизика*** имеет дело с *искусственно*-радиоактивными полями.

Несмотря на очевидную общность радиометрических и ядерно-геофизических методов, в основе которых лежит явление радиоактивности, существует различие в областях применения и характере решаемых задач с использованием естественной и искусственной радиоактивности.

Главной ***задачей*** радиометрических исследований является получение сведений, которые могут оказаться полезными (или решающими) при поисках, разведке и добыче радиоактивных руд и полезных ископаемых, генетически или парагенетически связанных с естественно-радиоактив-ными элементами (ЕРЭ). Радиометрические измерения при этом настолько же целесообразны, насколько необходимы, например измерения напряженности магнитного поля при поисках и разведке магнетитовых руд. Кроме главной, существуют и другие задачи, решение которых облегчается при наличии данных об особенностях поведения естественной радиоактивности природных сред в изучаемом регионе.

Хорошо известна высокая эффективность воздушной или автомобильной γ-спектрометрии для геологического картирования горных пород (например гранитов), отличающихся повышенными величинами кларков ЕРЭ. Минимальными значениями γ-полей характеризуются ультрабазиты, а также отложения известняков и некоторых других пород. Радиометрические

исследования широко используются при разведке и эксплуатации месторождений калийных солей, горючих сланцев, углей, фосфоритов, бокситов, редкометальной минерализации и других месторождений, связанных с аномальными проявлениями естественной радиоактивности.

Применение методов, основанных на использовании искусственной радиоактивности, оказалось эффективным на разных стадиях геологоразведочных работ (съемка, поиски, разведка и эксплуатация) применительно к очень широкому перечню полезных ископаемых.

Топливо (нефть, газ, уголь, уран), руды черных, цветных, редких и благородных металлов, месторождения нерудных полезных ископаемых (фосфориты, флюориты, сырье для керамической промышленности, асбест, пьезооптическое сырье), другие виды минерального сырья – объекты, поиски, разведку и эксплуатацию которых в настоящее время трудно проводить без привлечения ядерно-геофизических методов.

Останавливаясь на областях применения радиометрических и ядерно-геофизических методов, следует подчеркнуть, что получаемые с их помощью сведения об особенностях состава и свойств природных сред носят дистанционный характер. Речь идет об *изучении вещества на расстоянии*, что важно не только в практике геологоразведочных работ, но и для других целей. Так, с помощью γ-γ-плотномера, установленного на автоматической станции «Луна-13», были впервые получены сведения о плотности лунного грунта, а с помощью рентгенорадиометрического анализатора «РИФМА» (радиоизотопный флуоресцентный метод анализа) – сведения о составе лунных пород по трассам перемещения луноходов.

Существенным недостатком практически каждого из радиометрических методов является малая представительность получаемой информации, что объясняется большой поглощающей способностью твердых веществ по отношению к ядерным излучениям. По этой причине имеется отличие эффективности ядерных методов на разных стадиях геологоразведочных работ. Известно, что их поисковые возможности заметно уступают по эффективности результатам, получаемым на разведочной и, особенно, на эксплуатационной стадии, где ядерные методы практически незаменимы при контроле и управлении качеством минерального сырья.

В последние годы развивается новое направление в ядерно-геофизических исследованиях, связанное с дистанционным изучением особенностей состава околорудных гидротермально-измененных пород. Известно, что наличие ореолов гидротермального метасоматоза является

необходимой (хотя и недостаточной) предпосылкой для локализации оруденений гидротермального типа. Значительные размеры метасоматических ореолов, обычно во много раз превышающие размеры рудных тел, многократно увеличивают геохимическую «глубинность» ядерных методов, ориентированных на обнаружение и оконтуривание околорудных изменений.

Конечно, главная отдача от использования ядерных методов связана с ***разведкой*** месторождений, где они особенно широко используются для бескернового определения границ коллекторов нефти и газа, мощности угольных, рудных подсечений и других целей, включая решение проблемы дистанционной оценки линейных запасов полезной компоненты в рудных интервалах разведочных скважин. Несмотря на значительную отдачу в использовании ядерных методов при поисках и разведке, их применение на стадиях ***добычи*** и ***переработки*** минерального сырья рассматривается как не менее перспективное.

Известно, что совершенствование технологических процессов на добывающих и перерабатывающих предприятиях во многом зависит от достоверной и оперативной информации о качестве минерального сырья. Широко используемые для этой цели традиционные методы опробования и химического анализа во многих случаях не в состоянии удовлетворить требованиям современного производства в основном из-за низкой оперативности. Именно по этой причине на добывающих и перерабатывающих предприятиях все шире и с возрастающими масштабами используются геофизические, и в первую очередь ядерно-геофизические методы экспрессного контроля качества минерального сырья [15,33,38,75].

Помимо предприятий по добыче урановых руд, опыт радиометрического и ядерно-геофизического контроля и обогащения сырья имеется и на объектах других отраслей. Например, на предприятиях цветной металлургии для контроля и управления качеством оловосодержащего сырья широко используется рентгенорадиометрический метод (РРМ), основанный на явлении фотопоглощения γ-лучей и на законе Мозли. На основе этого метода разработаны эффективные технологии контроля качества полиметаллических руд на Pb и Zn, W и Mo, Ti в ильменитовом концентрате, Nb и Ta в редкометальных карбонатитах, другие полезные ископаемые, включая Sb, As и Ag. Для контроля качества руд легких элементов (Li, Be, B) высокоэффективными оказались методы нейтронной геофизики из-за высоких сечений захвата тепловых нейтронов ядрами лития и бора и благоприятной предпосылки для фотонейтронного расщепления бериллия.

На горнорудных предприятиях черной металлургии в последнее время начал применяться γ-абсорбционный метод, позволяющий получать оперативные сведения о содержании полезной компоненты в исследуемом материале так называемого квазибинарного состава. Наиболее подробно этот метод разработан применительно к хромитовым рудам Донского горно-обогатительного комбината (ГОКа), где использовался в различных вариантах, включая непрерывный анализ на конвейерной ленте.

Предложенная и разработанная уральскими геофизиками (Институт горного дела УрО РАН и кафедра ядерной геофизики УГГГА) технология γ-абсорбционных измерений на Cr оказалась универсальной, принципиально пригодной для квалиметрических целей при эксплуатации месторождений, руды которых по γ-лучевым свойствам могут быть отнесены к квазибинарным. Можно показать, что кроме хромитов к таким рудам относятся также марганцевые, железные и некоторые другие, например целестиновые, а также бруситы (если оценивать их качество по содержанию CaO).

Применительно к железным рудам γ-абсорбционный метод (ГАМ) может оказаться полезным при необходимости получения сведений о содержании так называемого общего Fe или когда связь между магнитной восприимчивостью и массовой долей железа оказывается неустойчивой.

При благоприятном поведении элементного состава матрицы γ-абсорбционный метод оказывается весьма эффективным при контроле и управлении качеством Mn-содержащего минерального сырья. В последнее время уже получены положительные результаты по использованию γ-просвечивания в условиях ферросплавного производства для целей дозирования марганцевого агломерата. Интересные результаты получены с помощью γ-абсорбционных измерений при оценке качества огнеупорного сырья (бруситы и продукты их переработки – периклазовый порошок).

В отличие от многочисленных разновидностей γ-γ-метода, работающих в режиме «отражения», γ-просвечивание позволяет получать экспрессную и достоверную информацию о ***количестве*** дробленого материала, прошедшего через рудоконтрольный пункт за произвольное время. Имеются и другие примеры эффективного использования методов ядерной геофизики в практике горнодобывающих работ, однако подлинные возможности ядерных и других геофизических методов для контроля и управления качеством минерального сырья еще далеко не исчерпаны.

Главным препятствием для более широкого использования прогрессивных «горно-геофизических» технологий является практическое

отсутствие геофизической службы на горно-обогатительных комбинатах ряда отраслей. Но даже и там, где такие службы в свое время были сформированы (урановое и редкометальное сырье, некоторые предприятия цветной и черной металлургии), ощущается острый недостаток геофизиков «горного профиля», поскольку отсутствует целенаправленная подготовка таких специалистов. В технических вузах горно-геологического профиля отсутствуют выпускающие кафедры горной геофизики, хотя необходимость в геофизиках для горно-металлургических предприятий является очевидной.

Важной областью применения ядерных методов является их использование для аналитических целей, особенно для надежного и экспрессного определения массовых долей редких и драгоценных металлов. Например, с помощью γ-активационного метода присутствие Au в геологических пробах определяется практически немедленно по интенсивности аналитической линии γ-излучения изомера Au^{197m}, образующегося в результате ядерной реакции (γ, γ′) за счет материнского изотопа Au^{197}. Для количественных определений Au широко используется также нейтронно-активационный анализ (НАА). В этом случае оказывается возможным определение Au в активированных пробах по искусственно-радиоактивному изотопу Au^{198}, который образуется в результате ядерной реакции (n, γ), идущей на тепловых нейтронах. При наличии достаточно мощных потоков нейтронного излучения, например с использованием нейтронных каналов реакторов атомных станций, оказывается возможным количественное определение содержания Au в пробах на кларковом уровне.

Нейтронный активационный анализ успешно используется в аналитических целях не только на Au, но и на другие элементы, включая редкоземельные. При этом в ряде случаев отсутствует необходимость «нейтронной накачки» исследуемых проб с помощью нейтронных каналов АЭС. К настоящему времени на вооружении геофизиков имеются полевые лаборатории с γ-спектрометрической аппаратурой и источниками нейтронов с выходом до 10^{11} н/с. Гамма-спектры активированных проб регистрируются с помощью полупроводниковых детекторов, а для расшифровки и интерпретации спектров применяется бортовая ЭВМ. Такая лаборатория для экспрессного многоэлементного анализа геологических проб создана, например, в Канаде [35]. Применение детекторов с высоким энергетическим разрешением позволяет идентифицировать одновременно более 20 редких элементов с пределом обнаружения 10^{-4} %. В полевых условиях используется также малогабаритная установка для многоэлементного нейтронно-активационного анализа, разработанная в США. В установке применяется калифорниевый

источник нейтронов с выходом $3 \cdot 10^7$ н/с (масса Cf^{252} – 12 мкг). Анализ ведется по короткоживущим радионуклидам, образующимся в результате ядерной реакции (n, γ). С помощью этой установки оказывается возможным экспрессное количественное определение Al и 12 редких элементов. Предел обнаружения Sc, V, Co, Se, Br, Ag и Dy - менее 1 мкг; Al, Ti, Cu и Gd – от 1 до 10 мкг; Ro и Ir – от 10 до 100 мкг [35].

Кроме отмеченных, имеются и другие варианты полевых ядерно-геофизических лабораторий, предназначенных для получения достоверной и экспрессной информации относительно особенностей элементного состава исследуемых природных сред. Например, на основе узкополосного дифференциального детектора (УДД) в НПО «Буревестник» разработана серия отечественных портативных рентгеновских приборов, обеспечивающих экспрессное определение ряда элементов, включая раздельное определение элементов со смежными атомными номерами, например Cr, Mn, Fe.

Особую роль в геологии и других отраслях знаний (археология, биология) играют способы датировки природных сред и живых организмов, в основе которых лежит постоянство скорости «остывания» любых, в том числе долгоживущих радионуклидов. К настоящему времени детально разработаны K-Ar, Rb-Sr, радиоуглеродный, U-Pb и другие методы определения абсолютного возраста самых разнообразных объектов.

Краткая история развития ядерных методов

Ядерная геохронология – это, пожалуй, первое приложение явления радиоактивности в геологии. Уже в 1902 г. П. Кюри, а вслед за ним Э. Резерфорд высказали мысль о том, что скорость радиоактивного распада элементов может быть использована в качестве эталона времени для определения абсолютного возраста горных пород. В 1907 г. эта идея получила практическое осуществление. Английский физик Б. Болтвуд по содержанию в горных породах U и конечного продукта его распада – Pb впервые определил абсолютный возраст урансодержащих минералов. В дальнейшем радиологические методы датировки минералов непрерывно совершенствуются и расширяются.

Кроме U-Pb-метода, разрабатываются U-He-, K-Ar-, Rb-Sr- и другие методы. В США в 1923 г. была организована специальная комиссия по измерению геологического возраста радиоактивными методами. В нашей стране такие измерения начали проводиться в Радиевом институте с 1924 г. Отечественные специалисты В. Г. Хлопин, К. А. Ненадкевич, Э. К. Герлинг, Л. В. Комлев, И. Е. Старик и др. внесли большой вклад в разработку радиоактивных способов датировки горных пород.

Параллельно с разработкой ядерных методов непрерывно исследуются особенности распределения радиоактивных элементов в земной коре и изучается тепло, выделяющееся при распаде ЕРЭ. Ведущую роль в изучении распределения радиоактивных элементов в земной коре играли отечественные ученые. В 1912 г. по инициативе и под руководством академика В. И. Вернадского в России была организована Радиевая экспедиция Академии наук. В начале 30-х годов проблемы ядерной геохронологии и радиотермии определились настолько отчетливо, что появилась самостоятельная отрасль геологии – радиогеология. Основоположником радиогеологии как самостоятельной ветви наук о Земле является В. И. Вернадский. Большой вклад в развитие радиологии внесли А. Е. Ферсман, В. Г. Хлопин, К. А. Ненадкевич, А. П. Соколов, И. Е. Старик, Г. В. Войткевич, В. И. Баранов и др.

С открытием явления радиоактивности (А. Беккерель, 1896 г., М. Кюри, 1898 г.) непрерывно разрабатываются методы исследования этого фундаментального явления. Разрабатываются также методы поисков и разведки месторождений радиоактивных руд, других полезных ископаемых, связанных с радиоактивностью.

Первые полевые работы, связанные с изучением радиоактивности, были выполнены отечественными геофизиками на урановом месторождении Тюя-Муюн (Средняя Азия). Здесь в 1923 г. А. П. Кириковым впервые был применен эманационный радоновый метод с целью поисков рудных тел на площадях, перекрытых чехлом четвертичных отложений. Несколько позже (1923-1925) Л. Н. Богоявленским были выполнены первые измерения естественного γ-излучения с целью поисков полезных ископаемых.

Эманационная съемка, разновидности γ-измерений (включая γ-γ-каро-таж скважин), некоторые виды радиометрического анализа геологических проб, γ-опробование руд в условиях естественного залегания впервые возникли в нашей стране. Некоторые из этих методов параллельно развивались в Германии; в США они начали применяться на несколько лет позже.

В 1924-1925 гг. были организованы радиометрические комитеты при Геолкоме (А. П. Кириков) и при Институте прикладной геофизики (Л. Н. Богоявленский). Исследования велись как по линии полевых радиометрических измерений, так и по линии исследования радиоактивности геологических коллекций образцов горных пород. Уже в 1925 г. в результате радиометрического изучения коллекций геолога С. Ф. Машковцева было открыто Табошарское месторождение урановых руд в Средней Азии. В 1926-1927 гг. на этом месторождении были выполнены эманационные и γ-измерения, позволяющие обнаружить новые рудные тела.

Существенную роль в разработке радиометрических методов как методов разведочной геофизики сыграл радиометрический кабинет при Ленинградском центральном научно-исследовательском геологоразведочном институте (А. П. Кириков, А. Г. Граммаков, Г. В. Горшков, Б. С. Айдаркин, П. Н. Тверской) и радиометрический кабинет при лаборатории ЦНИГРИ в Москве (В. И. Баранов, Е. Г. Грачева).

Курс лекций по радиометрии впервые прочитан Л. Н. Богоявленским в 1923-1924 гг. в Петроградском горном институте. В 1930 г. в Московском геологоразведочном институте создана первая в стране кафедра радиометрии во главе с В. И. Барановым (в настоящее время – кафедра ядерной геофизики и геоинформатики, зав. кафедрой – проф. А. А. Ники-тин).

Мощным толчком к дальнейшему развитию ядерно-геофизических методов послужила проблема поисков, разведки и эксплуатации месторождений нового вида энергетического и стратегического сырья – урана. С этой целью уже в первые послевоенные годы совершенствуется техника и методика радиометрических измерений. Появляются автомобильный и воздушный варианты γ-съемки. Развивается теория этих методов, методика измерений и способы интерпретации результатов. Создается и внедряется в практику γ-спектрометрическая аппаратура, позволяющая получать сведения о долях K, U и Th в суммарной γ-активности пород. А. Г. Граммаков, В. Л. Шашкин и др. разработали метод анализа радиоактивности горных пород в условиях естественного залегания (*in situ*) и в лабораториях. Полевые методы измерений естественной радиоактивности к настоящему времени достигли высокой степени развития. Эти методы в разных модификациях, от аэро-γ-спектрометрии до γ-измерений в скважинах (приоритет в изобретении γ-каротажа принадлежит отечественным геофизикам: Г. В. Горшков, Л. М. Курбатов, В. А. Шпак – 1935 г.) стали неотъемлемой частью геолого-съемочных, поисковых, разведочных и эксплуатационных работ.

Собственно ядерно-геофизические методы, составляющие арсенал современных средств ядерной геофизики и основанные на эффектах взаимодействия ядерных излучений с веществом, появились позже радиометрических методов. Их появление связано с потребностями отраслей хозяйства в различных видах минерального сырья: от нефти, газа и угля до редких и драгоценных металлов. Возможности ядерных методов заметно расширились благодаря развитию атомной энергетики, когда оказалось возможным получение в широких масштабах источников α-, β-, γ- и *n*-излучений.

Среди ядерно-геофизических методов важное значение принадлежит методам нейтронной геофизики, среди которых выделяется нейтронный активационный анализ. В его основе лежит явление искусственной радиоактивности, за открытие которого в 1934 г. французские физики Ирен и Фредерик Жолио-Кюри были удостоены Нобелевской премии. Несколько позже итальянский физик Э. Ферми предложил использовать нейтронное излучение для изучения состава вещества. Образующиеся в результате взаимодействия нейтронов с ядрами вещества искусственно-радиоактивные продукты являются объектом изучения в активационном анализе.

Вслед за фундаментальным открытием явления искусственной радиоактивности были предприняты успешные попытки использовать его для прикладных целей в различных областях науки и техники, в том числе и в геологии. В 1935 г. венгерские ученые Хевиши и Леви исследовали искусственно-радиоактивные изотопы, образующиеся при облучении нейтронами редкоземельных элементов. Эти работы положили начало развитию нейтронного активационного анализа. В 1940 г. Р. Е. Фирон предложил использовать активацию нейтронами Al для расчленения горных пород в скважинах при поисках бокситов. В патентной заявке содержалась схема глубинного зонда, в котором источник нейтронов заключался между двумя детекторами γ-лучей. При подъеме снаряда по скважине верхний детектор регистрировал интенсивность естественного γ-излучения, а нижний – суммарное γ-излучение (естественное и искусственно созданное).

В нашей стране предложение об использовании искусственной радиоактивности для литологического расчленения горных пород в скважинах было впервые высказано в 1946 г. А. А. Коржевым. Реализация этого предложения была начата в 1950 г. в Московском институте нефтяного хозяйства по инициативе проф. В. Б. Лапука, а с 1953 г. в Институте нефти АН СССР под руководством академика Г. Н. Флерова и проф. Ф. А. Алексеева.

Важным достижением в совершенствовании технологии геофизических исследований скважин следует считать предложенный в 1942 г. физиком-ядерщиком Б. Понтекорво нейтронный γ-метод, который позволил получать информацию о распределении Н по оси скважин. Появление этого метода по праву считается крупным «подарком» геологии со стороны физиков, поскольку благодаря возможности получения дистанционной информации о распределении водорода по разрезу скважины геологи оказались в состоянии перейти на бескерновое бурение нефтяных скважин.

В 1947 г. Холленбах предложил γ-γ-метод, основанный на регистрации рассеянного γ-излучения. Физической основой этого метода является эффект

Комптона, названный так в часть лауреата Нобелевской премии, исследовавшего процессы взаимодействия γ-квантов с электронами.

Период с 1950 г. характеризовался исследованиями по усовершенствованию γ-γ-метода. В 1954 г. метод впервые был успешно испытан для выделения рудных (М. М. Соколов, А. П. Очкур) и угольных подсечений в скважинах (Ю. П. Булашевич, Г. М. Воскобойников, 1955-1957 гг.). В 1957 г. Г. М. Воскобойников предложил модификацию γ-γ-каротажа с источниками мягких γ-лучей, названную им селективным γ-γ-каротажем (ГГК-С). Этот метод обладает высокой чувствительностью даже к небольшим изменениям эффективного атомного номера природных сред. В определенных условиях с помощью ГГК-С оказалось возможным определение концентрации тяжелых металлов в рудах (Г. М. Воскобойников) и зольности каменных углей (В. И. Уткин, 1966 г.). Значительный вклад в теорию и практику γ-γ-измерений внесли Е. М. Филиппов, И. Г. Дядькин, В. А. Арцыбашев и др.

В качестве важного этапа развития методов, основанных на взаимодействии γ-лучей с веществом, следует отметить исследования Л. Рейфела и Р. Хемфриса по рентгенофлуоресцентному анализу вещества с использованием источников γ-лучей. В 1958 г. А. Л. Якубович и В. Ю. Залесский разработали методику и аппаратуру для количественных определений металлов в геологических пробах, доказав реальную возможность применения метода, названного ими рентгенорадиометрическим (РРМ). Важным этапом в развитии этого метода были работы специалистов кафедры ядерной геофизики Ленинградского университета (В. А. Мейер, В. С. Нахабцев и др.) по созданию скважинного варианта РРМ. Разработка РРК послужила основой для широкого использования рентгенофлуоресцентного метода при исследовании состава руд в горных выработках (Е. П. Леман и др.), на обнажениях, т. е. в естественном залегании. В дальнейшем РРМ стал использоваться также как средство контроля и сортировки минерального сырья на ГОКах при добыче и обогащении руд цветных металлов.

Для контроля и управления качеством минерального сырья и продуктов переработки руд черных металлов весьма эффективным оказался также γ-абсорбционный метод, в разработке которого большую роль сыграли уральские геофизики (С. Г. Возженников, Ю. В. Белышев и др.).

В начале 60-х годов появились работы геофизиков Московского геологоразведочного института (В. М. Бондаренко, Г. Г. Викторов и др.), связанные с разработкой нового способа подземных геофизических исследований, основанного на регистрации проникающего космического излучения.

В середине 50-х годов заметно усилилось внимание к методам нейтронной геофизики. В 1956 г. академик Г. Н. Флеров обосновал применение так называемого импульсного варианта нейтрон-нейтронного каротажа (ННК) для решения ряда проблем нефтяной геофизики, например установление положения водонефтяного контакта в скважине. Появление импульсного нейтрон-нейтронного каротажа (ИННК), разработка которого была выполнена С. А. Кантором, Ю. С. Шимилевичем, Б. Г. Ерозолимским, А. С. Школьниковым, Д. Ф. Беспаловым (ВНИИ ядерной геофизики и геохимии), ознаменовало начало внедрения скважинных генераторов нейтронов.

В рудной геофизике ядерные методы появились несколько позже, чем в нефтяной отрасли. В начале 60-х годов появились первые технологии дистанционного определения линейных запасов полезных ископаемых в рудных подсечениях разведочных скважин, пройденных с недостаточным выходом керна или его отсутствием: Cu в медных колчеданах (Г. С. Возженников, 1961 г), Al в бокситах (И. Н. Сенько-Булатный, 1963 г.), черные металлы (К. И. Якубсон, 1964 г.), F во флюоритовых рудах (В. Я. Бардовский, 1965 г.). Бериллий в редкометальных рудах – И. П. Кошелев, А. К. Сенько, Е. М. Филиппов, В. В. Шестаков и др., 1959-1966 гг.

С появлением полупроводниковых детекторов были решены задачи о редкометальных ассоциацях в связи с прогнозированием рудных месторождений (Au в черных сланцах Средней Азии – П. А. Ваганов, 1981 г.).

Историю развития методов ядерной геофизики невозможно с необходимыми подробностями изложить в вводном разделе курса лекций. Перечислим лишь основные организации, без упоминания которых невозможно осветить даже ключевые моменты развития ядерно-геофизических методов в нашей стране. В добавление к уже упоминавшимся учреждениям или лабораториям, сыгравшим основополагающую роль в формировании ядерного направления в разведочной геофизике, отметим, что некоторые лаборатории или научные группы в разное время вошли в состав крупных научно-исследовательских центров – ВНИИ ядерной геофизики и геохимии, ВНИИ разведочной геофизики, ВНИИ минерального сырья, ВНИИ радиационной техники, ВНИИ геофизических исследований скважин и др.

Были созданы ядерно-геофизические лаборатории при Институте геофизики Уральского научного центра АН (Ю. П. Булашевич), при Институте геологии и геофизики Сибирского отделения АН (Е. М. Филип-пов) и др.

Еще на рубеже 40-50-х годов по инициативе академика И. В. Курчатова для обеспечения специалистами научных и производственных организаций в ряде вузов страны была организована подготовка инженеров выпускающими

кафедрами ядерно-геофизического профиля: в Московском геологоразведочном институте – МГРИ (В. И. Баранов, А. С. Сердюкова, Д. Ф. Зимин), Ленинградском университете – ЛГУ (В. А. Мейер, А. А. Са-турин, П. А. Ваганов), Ленинградском горном институте – ЛГИ (Г. Ф. Новиков, Ю. Н. Капков, А. Я. Синицын), Московском институте нефтехимической и газовой промышленности – МИНХиГП (В. Н. Дахнов, В. В. Ларионов, Д. А. Кожевников), Свердловском горном институте – СГИ (Н. А. Иванов, Ю. П. Булашевич, Г. С. Возженников).

Из названия учебного пособия следует, что его основу составляет одноименный курс лекций, который преподается студентам геофизического факультета СГИ (ныне Уральский государственный горный университет) с 1952 г. Формирование и развитие курса, особенно разделов книги 1 и 2, происходило в значительной степени под влиянием профессоров Н. А. Иванова и Ю. П. Булашевича, которые в свое время (1952-1959) начинали преподавание этой дисциплины на геофизическом факультете СГИ. Наряду с отмеченным в книгу включены сведения, заимствованные из литературных источников (учебные пособия, монографии, справочники), а также оригинальные материалы из работ авторов.

Третий раздел книги составлен на основе спецкурса «Ядерная геофизика», который был подготовлен и впервые прочитан Г. С. Возженниковым в 1970 г. на геофизическом факультете СГИ для студентов старших курсов специализации ядерно-геофизического профиля.

Авторы будут признательны всем, кто сочтет возможным прислать замечания и пожелания по изложенному в курсе материалу по адресу: 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Уральский государственный горный университет, факультет геологии и геофизики, кафедра геофизики.

1. ОСНОВЫ УЧЕНИЯ О РАДИОАКТИВНОСТИ

1.1. Общие сведения

Радиоактивность – физическое явление, заключающееся в способности ядер некоторых элементов самопроизвольно распадаться с испусканием ядерных излучений. При этом исходное (*материнское*) ядро превращается в *дочернее* ядро – продукт распада. Явление радиоактивности связывают также со взаимным превращением одних элементарных частиц в другие (например, нейтронов в протоны).

Различают *естественную* и *искусственную* радиоактивность. Естественная радиоактивность наблюдается у неустойчивых изотопов, существующих в природе. Искусственная радиоактивность – радиоактивность нуклидов, полученных с помощью ядерных реакций. При этом ядерные свойства данного радионуклида не зависят от способа его получения.

История открытия естественной радиоактивности связывается с именем немецкого физика Рентгена, который в 1895 г. открыл лучи, впоследствии названные его именем. В первых опытах испускание так называемых *X*-лучей сопровождалось флуоресценцией стеклянных стенок рентгеновской трубки. Вскоре были выполнены исследования флуоресценции, чтобы выяснить, всегда ли она сопровождается испусканием рентгеновского излучения. Опыты проводились с завернутыми в черную бумагу фотопластинками, на которые накладывались разные вещества, флуоресцирующие под действием яркого света. Если флуоресценция сопровождается испусканием рентгеновских лучей, то фотопластинки должны почернеть.

При испытании большого количества флуоресцирующих веществ французский ученый Беккерель в 1896 г. обнаружил, что ожидаемый эффект дают урансодержащие вещества. Однако дополнительные опыты показали, что почернение фотопластинки не было связано с флуоресценцией, так как почернение наблюдалось даже в том случае, когда соли U не освещались. В дальнейшем было установлено, что наблюдаемое излучение характерно для всех соединений U, а наиболее эффективным был металлический U. Оказалось, что интенсивность излучения не зависит от внешних условий и не меняется со временем. Таким образом было установлено, что наблюдаемый эффект является внутренним свойством атомов U.

Свойство атомов (в то время еще не существовало представления об атомном ядре) урана испускать излучение Пьер и Мария Кюри назвали радиоактивностью. Вскоре супруги Кюри открыли радиоактивность другого тяжелого элемента – тория. Как и в случае с ураном, оказалось, что это явление

не связано с физико-химическим состоянием вещества, а является свойством элемента. Позднее анализ урансодержащих руд привел к открытию полония и радия, удельная радиоактивность которых оказалась значительно выше, чем у U и Th.

Впервые радиоактивное излучение было проанализировано Резерфордом при помощи опытов по наблюдению за его поведением в электрическом и магнитных полях и поглощению в веществе. В результате этих опытов установлено, что радиоактивные вещества испускают 3 вида лучей:

1. α-*лучи* – тяжелые положительно заряженные частицы, двигающиеся со скоростью ~10^9 см/с и поглощающиеся алюминиевой фольгой. Впоследствии было установлено, что этими частицами являются ядра $_2He^4$.

2. β-*лучи* – легкие заряженные частицы, двигающиеся со скоростью, близкой к скорости света и поглощаемые слоем алюминия толщиной в несколько мм. Этими частицами оказались электроны (в дальнейшем были обнаружены и положительно заряженные β-частицы – позитроны).

3. γ-*лучи* – сильно проникающее излучение, не отклоняющееся ни в электрическом, ни в магнитном полях. Природа γ-лучей – жесткое электромагнитное излучение с длиной волны менее 10 нм (<10^{-9} м). Гамма-излучение связано с энергетической перестройкой ядер, испытывающих то или иное ядерное превращение.

1.2. Элементы строения атомных ядер

Атомное ядро представляет собою систему, состоящую из некоторого числа сильно связанных между собой частиц – протонов и нейтронов, которые обычно называют *нуклонами* (от лат. *nucleos* – ядро). Идея о протонно-нейтронном составе ядра была впервые высказана академиками Д. Иваненко и А. Амбарцумяном в 1930 г.

Протон (*p*) – элементарная частица, имеющая единичный положительный заряд, равный по абсолютной величине заряду электрона, представляет собою ядро основного изотопа водорода $_1H^1$. Таким образом, масса протона равна массе атома водорода за вычетом массы электрона. Так как масса атома H составляет 1,00814 атомных единицы массы (а.е.м.), а масса электрона составляет 0,00055 а.е.м., то масса протона равна 1,00759 а.е.м. (1,672·10^{-24} г.).

Нейтрон (*n*) - электрически нейтральная частица с массой, близкой и немного большей, чем у протона (1,00893 а.е.м., 1,674·10^{-24} г.).

Количество протонов в ядре равно порядковому (атомному) номеру элемента в периодической системе Менделеева и обозначается Z. Общее количество протонов и нейтронов в ядре определяет его массовое число (атомный вес) и обозначается A. Число нейтронов в ядре равно A-Z.

Разновидности одного и того же химического элемента с одинаковыми значениями Z и разными массовыми числами называются *изотопами* (равноместными). Элементы с нечетными атомными номерами являются либо моноизотопными, либо состоят не более чем из двух изотопов. Четные элементы, как правило, являются полиизотопными.

Атомы с одинаковыми A, но разными Z (принадлежащим разным химическим элементам) называются *изобарами* (барос - вес).

Атомы с одинаковым числом нейтронов A-Z называют *изотонами*.

В легких ядрах (с малым Z) обычно содержится равное или примерно равное количество протонов и нейтронов, в тяжелых ядрах нейтронов примерно в 1,5 раза больше, чем протонов. Связь Z с A для стабильных ядер описывается эмпирической формулой [41]

$$Z = \frac{A}{1{,}98 + 0{,}015A^{2/3}},$$

следовательно, для легких ядер отношение $Z/A \approx 0{,}5$.

Нуклоны, входящие в состав атомных ядер, испытывают конкуренцию кулоновских сил отталкивания и ядерных сил сцепления. Преобладание первых приводит к распаду ядра, вторых – к его устойчивому состоянию.

Сравнение массы атомного ядра с суммой масс входящих в его состав нуклонов показывает, что масса ядра всегда меньше суммы масс всех составляющих его протонов и нейтронов. Разность между суммой масс нуклонов и массой ядра называется *дефектом массы* Δm, определяет *энергию связи* ядра относительно составляющих его нуклидов. Если обозначить через m_p, m_n и $M_я$ соответственно массы p, n и ядра, то

$$\Delta m = \left[m_p Z + m_n (A - Z)\right] - M_я. \qquad (1.1)^*$$

Согласно формуле Эйнштейна, каждому значению массы соответствует определенная энергия $E = mc^2$, так что энергию связи ядра W можно выразить следующим образом:

$$W = \Delta m c^2. \qquad (1.2)$$

Энергия связи представляет собою ту энергию, которую надо затратить, чтобы разделить нуклоны, «упакованные» в ядре с плотностью порядка 10^8

* Здесь и далее для широко известных формул и определений ссылки не приводятся.

т/см^3. Таким образом, энергия связи является мерой прочности ядра. Особенно велика энергия связи у четно-четных ядер, т. е. у ядер с четным числом протонов и нейтронов, например у $_2He^4$, $_6C^{12}$, $_8O^{16}$ и др.

Энергия связи, отнесенная к массовому числу, называется *удельной энергией связи*, или средней энергией связи нуклона в ядре, $\varepsilon = W/A$. Средняя энергия связи нуклона в ядре изменяется от ядру к ядру. На рис. 1.1 приводится зависимость ε от массового числа A.

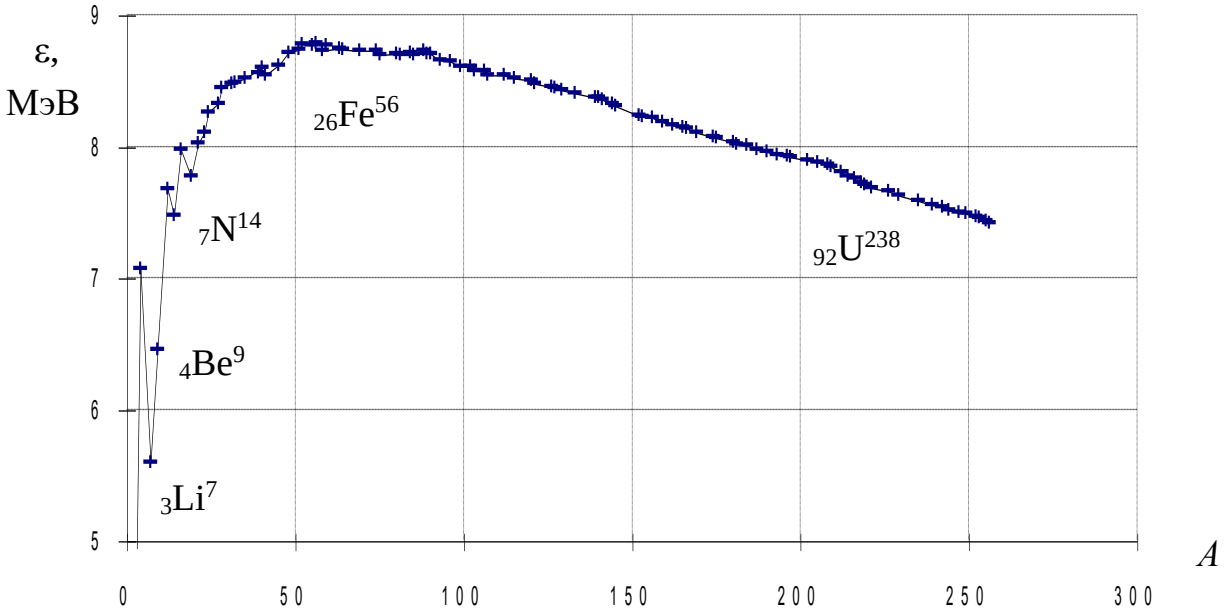


Рис. 1.1

Наименьшее значение энергии связи нейтрона имеет место для изотопа $_4Be^9$. В случае распада $_4Be^9$ на две α-частицы и нейтрон она составляет 1,67 МэВ, хотя энергия связи ядра $_4Be^9$, отнесенная ко всем девяти составляющим его нуклонам, равна 6,46 МэВ.

Ядра тяжелых элементов имеют очень большую энергию связи относительно всех составляющих его нуклонов, однако, например, для $_{92}U^{238}$ энергия связи в случае распада этого ядра на $_2He^4$ и $_{90}Th^{234}$ оказывается отрицательной (-4,25 МэВ). Это означает, что ядро урана является неустойчивым и распадается на α-частицу и ядро $_{90}Th^{234}$ с выделением избытка энергии. Точно так же U обладает отрицательной энергией связи для двух примерно равных по массе осколков деления, что определяет спонтанное (самопроизвольное) деление ядер U на два примерно равных по массе осколка деления.

Нуклоны, находящиеся на периферии атомных ядер, окружены не со всех сторон другими нуклонами, поэтому они связаны ядерными силами слабее

внутренних. Кроме того, ядерные силы начинают проявлять себя лишь на расстоянии, сравнимом с размером нуклона, в результате чего нуклоны в ядре сцеплены фактически лишь со своим ближайшим окружением. Следовательно, ядерные силы в отличие от кулоновских обладают свойством насыщения. По мере роста массового числа A уменьшается доля поверхностных нуклонов, и средняя энергия связи, приходящаяся на нуклон, сначала растет (рис. 1.1). По мере увеличения Z кулоновское отталкивание нуклонов непрерывно растет, поскольку эти силы имеют радиус действия порядка атомных размеров, и, следовательно, каждый протон взаимодействует со всеми другими протонами ядра.

Для сохранения устойчивости тяжелые ядра содержат большее количество нейтронов, чем протонов: с ростом числа нейтронов увеличивается среднее расстояние между протонами и уменьшаются кулоновские силы отталкивания. Однако эти «меры» лишь частично компенсируют рост сил отталкивания в ядре по мере увеличения A, в связи с чем удельная энергии связи ε начинает уменьшаться уже при $A > 60$. Ядра с $A > 230$ становятся неустойчивыми.

1.3. Виды ядерных превращений

Ядерные (или *радиоактивные превращения*) происходят с изменением строения и энергетического состояния ядра атома и сопровождаются испусканием или захватом заряженных частиц, делением ядра или испусканием коротковолнового γ-излучения электромагнитной природы.

Различают следующие основные виды *ядерных превращений*: α-распад, β-распад (электронный β^--распад, позитронный β^+-распад и электронный захват), изомерный переход (ИП) и деление ядер (*f*-распад).

1.3.1. Альфа-распад

Заключается в превращении материнского ядра ***A*** в дочерний продукт ***B*** путем испускания α-частицы, представляющей собою ядро $_2He^4$. Альфа-частицы имеют массу, равную 4,002264 а.е.м. ($6{,}598 \cdot 10^{-24}$ г.), и несут двойной электрический заряд, равный $3{,}2044 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Радиоактивные элементы испускают α-частицы разной энергии (2-10 МэВ), однако для каждого элемента начальная энергия α-частиц постоянна и является характеристической величиной, если не учитывать особенности, связанные с так называемой «тонкой структурой» α-спектров.

Вылет α-частицы с кинетической энергией E_α из ядра радиусом R_o с потенциальным барьером $U_0 > E_\alpha$ представляет случай *туннельного перехода* частицы через кулоновский барьер (в силу соотношения неопределенности $\Delta E \Delta t \sim h$). Схема α-распада записывается следующим образом:

$${}_Z\boldsymbol{A}^M - {}_2\alpha^4 \rightarrow {}_{Z-2}\boldsymbol{B}^{M-4}.$$

Другими словами, заряд дочернего ядра в случае α-распада уменьшается на 2, а массовое число на 4 соответствующие единицы. Дочерний продукт α-распада перемещается в таблице Менделеева на 2 клетки влево. Примером α-распада может служить превращение Ra в Rn (эманация Ra):

$${}_{88}\mathrm{Ra}^{226} - {}_2\alpha^4 \rightarrow {}_{86}\mathrm{Ra}^{222}.$$

Альфа-распад часто сопровождается γ-излучением с энергией E_γ от десятков до первых сотен кэВ. Возникновение γ-лучей связано с *тонкой структурой* α-спектра, сущность которого заключается в том, что часть материнских ядер испускает α-частицы с энергией $E_\alpha < E_\alpha^{\max}$. Дочерние ядра при этом оказываются в состоянии возбуждения и переходят в *основное энергетическое состояние* (уровень, при котором ядро обладает наименьшей эквивалентной массой) путем высвечивания избыточной энергии в виде γ-излучения сравнительно небольшой энергии и интенсивности.

При прохождении через вещество энергия α-частицы расходуется в основном на ионизацию и возбуждение атомов. Вследствие большой начальной энергии при столкновении с молекулами поглощающей среды α-частица образует на длине своего пробега (трека) сотни тысяч пар ионов. В этом смысле говорят о большой ионизирующей способности α-частиц. Оценим количество пар ионов, которые образуются на длине трека α-час-тицы при распаде ядер ${}_{84}\mathrm{Po}^{210}$. Имея в виду, что $E_\alpha^{\mathrm{Po}} = 5{,}3$ МэВ, а энергия, затрачиваемая на образование одной пары ионов, составляет ~30 эВ, имеем около 175 тысяч эффектов ионизации. Из-за относительно малой величины энергии, затрачиваемой α-частицей на один акт ионизации, α-частица после взаимодействия с атомом не меняет направления своего переноса, ее траектория движения в веществе является прямолинейной.

Отличительной способностью α-частиц является их малая проникающая способность. В зависимости от начальной энергии пробег α-частиц в воздухе составляет несколько сантиметров и может быть найден из следующей эмпирической формулы:

$$R_\alpha(E) = 0{,}316 E_\alpha^{3/2}, \qquad (1.3)$$

где E_α - энергия α-частицы, МэВ;

$R_\alpha(E)$ - пробег α-частицы в воздухе, см.

В твердом веществе пробег еще меньше, измеряется микронами и может быть найден с помощью эмпирической *формулы Брегга-Климэна*:

$$L_\alpha(E) = 3{,}2 \cdot 10^{-4} R_\alpha(E) \frac{\sqrt{A}}{\rho}, \qquad (1.4)$$

где A и ρ - соответственно атомный вес и плотность среды переноса α-частицы с энергией E.

Поскольку начальная энергия вылета α-частиц для данного типа α-излучателя постоянна, то длина их пробега в каждом конкретном веществе является также постоянной величиной. Между длиной пробега α-частиц (их энергией) и постоянной распада α-излучателей λ существует тесная связь. Согласно *правилу* (*закону*) *Гейгера-Неттола* эта связь выражается следующим образом:

$$\lg\lambda = A\lg R_\alpha + B, \qquad (1.5)$$

где A и B - коэффициенты, несколько отличающиеся для α-излучателей семейств урана и тория.

Ионизация и возбуждение α-частицами атомов различных веществ сопровождаются их химическими изменениями, нарушением кристаллической структуры твердых тел, выделением тепла, почернением фотопластинок, люминесценцией ряда веществ и другими физико-химическими явлениями. Явление люминесценции используется для регистрации ядерных частиц. Хорошим люминофором для регистрации α-частиц является сернистый цинк, активированный серебром ZnS(Ag).

1.3.2. Бета-распад

Различают три разновидности β-распада: электронный, позитронный и электронный захват (*K*-захват).

Электронный β-распад (β⁻-распад). Заключается в ядерном превращении нейтрона в протон по следующей схеме:

$${}_0n^1 \rightarrow {}_1p^1 + \beta^- + \tilde{\upsilon}.$$

Энергия β⁻-распада ($E_\beta{}^{max}$) распределяется сложным (случайным) образом между электроном и антинейтрино, поэтому энергетический спектр β-излучения в отличие от α-спектра, является непрерывным (рис. 1.2), причем

максимум кривой распределения β-частиц по энергиям приходится на энергию, составляющую примерно треть от E_β^{max}.

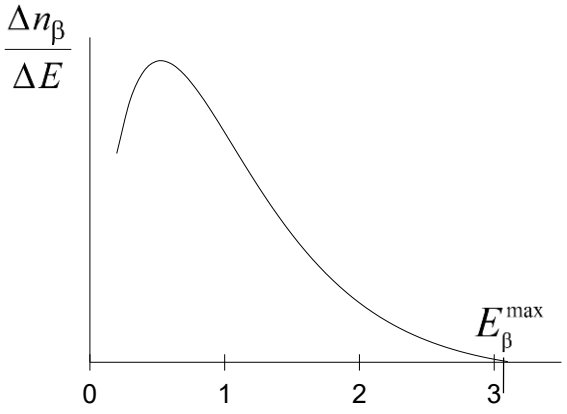


Рис. 1.2

Часть дочерних ядер при своем образовании оказывается на промежуточных энергетических уровнях и при переходе на основной уровень испускают γ-лучи квантованных линий.

В результате электронного β^--распада образуется дочернее ядро с тем же массовым числом, но его порядковый номер будет на единицу больше.

Схему β^--распада можно представить следующим образом:

$${}_Z\boldsymbol{A}^M - \beta^- \rightarrow {}_{Z+1}\boldsymbol{B}^M + \breve{\upsilon}.$$

По этой схеме распадаются не только естественные радионуклиды, но и искусственно-радиоактивные изотопы, например:

$${}_{29}Cu^{64} - \beta^- \rightarrow {}_{30}Zn^{64} + \breve{\upsilon}.$$

Представление о частицах, не обладающих ни зарядом, ни массой покоя, было введено в 1930 г. Паули для объяснения непрерывности β-спектра; для таких частиц Ферми предложил термин «нейтрино» («маленький нейтрон», «нейтрончик»). Впоследствии была предложена концепция антинейтрино $\breve{\upsilon}$, согласно которой нейтрино υ испускается при β-распаде одновременно с позитроном, а $\breve{\upsilon}$ – вместе с электроном. Нейтрино и $\breve{\upsilon}$ отличаются противоположными направлениями спинов.

Специфические свойства нейтрино (отсутствие заряда и практическое отсутствие массы) делают чрезвычайно трудными опыт по их обнаружению. Оценка сечения взаимодействия нейтрино с ядром приводит к величине $\sigma \approx 10^{-44}$ см^2, что соответствует среднему пробегу в концентрированной среде ($n_a \sim 10^{22}$ атомов/см^3), равному $n_a\sigma \approx 10^{17}$ км.

Очевидно, что столь малый эффект взаимодействия нейтрино с веществом можно обнаружить лишь при наличии мощных потоков этих частиц. В последние годы уже возникал вопрос об использовании мощных потоков нейтрино подземных ядерных взрывов для нейтринного «просвечивания» Земли как планеты. Главной трудностью для реализации такого проекта является его большая стоимость.

При прохождении электронов через вещество их энергия в основном расходуется на ионизацию и на возбуждение атомов. При больших энергиях электронов значительная ее часть затрачивается на образование электромагнитного излучения, называемого *тормозным*. Последнее связано с тем, что, в отличие от α-частиц, электроны взаимодействуют как с электронными оболочками атомов, так и с их ядрами. Так как массы взаимодействующих β-частиц и атомных электронов равны, то, помимо потерь энергии, электроны отклоняются от своего первоначального направления, т. е. рассеиваются. Траектории электронов не прямолинейны, а суммарная длина их пробега существенно превышает толщину слоя вещества, через который они могут пройти.

Между пробегом электронов и максимальной энергией β-спектра E_{max} существуют следующие эмпирические зависимости:

$$\begin{cases} R_m = 0{,}407\, E_{max}^{1{,}38}, \; E_{max} \le 0{,}8 \text{ МэВ} \\ R_m = 0{,}54\, E_{max}, \quad E_{max} > 0{,}8 \text{ МэВ}, \end{cases} \qquad (1.6)$$

где R_m - массовый пробег, г/см^2;

E_{max} - энергия электронов, МэВ.

Позитронный β-распад (β$^+$-распад). Заключается в ядерном превращении протона в нейтрон по следующей схеме:

$${}_1p^1 \rightarrow {}_0n^1 + \beta^+ + \upsilon .$$

В результате позитронного β-распада образуется дочернее ядро с тем же массовым числом, но с порядковым номером на единицу меньше:

$${}_Z\boldsymbol{A}^M - \beta^+ \rightarrow {}_{Z-1}\boldsymbol{B}^M + \upsilon .$$

Пример β$^+$-распада для искусственно-радиоактивного изотопа ${}_{29}Cu^{64}$:

$${}_{29}Cu^{64} - \beta^+ \rightarrow {}_{28}Ni^{64} + \upsilon .$$

Так же, как и в случае β$^-$-распада, энергия позитронного распада E_{max} распределяется случайным образом между позитроном и нейтрино, поэтому энергетический спектр позитронного распада непрерывен.

Следует заметить, что превращение ${}_1p^1$ в ${}_0n^1$ надо понимать в условном смысле. Поскольку масса протона несколько меньше, чем масса нейтрона, то позитронный распад свободного протона невозможен. Однако для протона, связанного в ядре, подобное превращение возможно, так как недостающая энергия восполняется (дотируется) ядром.

Позитрон, как и все античастицы, недолговечен. При взаимодействии позитрона с электроном возможно взаимное «уничтожение» этих частиц. В этом смысле говорят об *аннигиляции* позитрона. При аннигиляции позитрона и электрона возникают кванты электромагнитного поля. Число γ-квантов при аннигиляции определяется законами сохранения энергии и импульса. Наиболее распространена аннигиляция, в результате которой за счет античастицы образуется фотонная пара с энергией каждого из аннигиляционных квантов, равной энергии покоящегося электрона. Поскольку энергия электрона, находящегося в покое, равна $m_e c^2$, то β^+-распад обычно сопровождается так называемого аннигиляционным γ-излучением с энергией 511 кэВ. Таким образом, позитронные излучатели возможно принципиально обнаружить по наличию аннигиляционного излучения.

В качестве примера можно сослаться на возможность дистанционного определения Cu по искусственно-радиоактивному изотопу $_{29}Cu^{64}$. В схеме его распада имеется позитронное излучение, поэтому присутствие меди обнаруживается по γ-лучам с энергией 511 кэВ.

Электронный захват (*К*-захват). Третья разновидность β-рас-пада – электронный захват (ЭЗ) был открыт американским физиком Альварецом в 1938 г. Сущность электронного захвата заключается в захвате ядром электрона из внутренней оболочки собственного атома. При этом один из протонов внутри ядра трансформируется в нейтрон, а за пределы ядра выбрасывается нейтрино:

$$_1p^1 + \beta^- \rightarrow {}_0n^1 + \upsilon\,.$$

В результате электронного захвата образуется дочернее ядро с тем же массовым числом, но с порядковым номером на единицу меньше:

$$_Z\boldsymbol{A}^M + \beta^- \rightarrow {}_{Z-1}\boldsymbol{B}^M + \upsilon\,.$$

Природа электронного захвата была раскрыта при изучении сопровождающего его рентгеновского излучения. Оказалось, что оно соответствует переходу электронов на освободившееся место в электронной оболочке, образовавшееся после электронного захвата. Электронный захват имеет существенное значение для тяжелых ядер, у которых *К*-оболочка расположена близко к ядру. Наряду с захватом электрона из *К*-оболочки (*К*-захват) значительно реже наблюдается захват электрона из *L*-оболочки (*L*-захват), *М*-оболочки (*М*-захват) и т. д.

Своеобразный характер процесса ЭЗ (не испускание, а захват электрона атомом) приводит к тому, что в случае ЭЗ постоянная распада λ оказывается в некоторой зависимости от внешних условий.

Примером *К*-радиоактивного ядра является изотоп $_{19}K^{40}$, захватывающий *К*-электрон и превращающийся в ядро $_{18}Ar^{40}$ по схеме:

$$_{19}K^{40} + \beta^{-} \rightarrow {}_{18}Ar^{40} + \upsilon\,.$$

Нейтрино, образующееся по этой схеме, отличается от нейтрино, связанного с позитронным излучением (β^{+}-распадом) своей монохроматичностью (моноэнергетичностью).

Ядерное превращение калия в аргон лежит в основе так называемого K-Ar-метода, который используется для определения абсолютного возраста калийсодержащих горных пород по количеству накопившегося аргона.

1.3.3. Изомерный переход

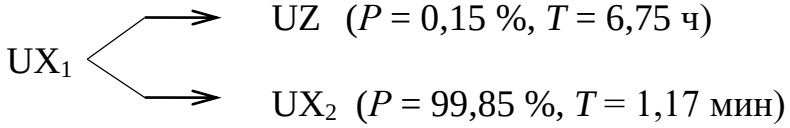
Один из видов ядерных превращений, представляющий собою переход ядра из *метастабильного* состояния в *основное*. Под метастабильным состоянием понимается такое возбужденное состояние ядра, период «высвечивания» которого по крайней мере на несколько порядков больше периода высвечивания при простом возбуждении ядра. Таким образом, состояние ядра будет метастабильным, если вероятность перехода его на основной уровень очень мала. Периоды полураспада *изомеров* (ядер в метастабильном состоянии) колеблются от 10^{-4} с до нескольких месяцев.

Переход ядер в метастабильное состояние осуществляется после ядерных превращений, происходящих в результате захвата тепловых нейтронов, фотонейтронного процесса, бомбардировки ядер тяжелыми частицами и т. д. Изомерный переход всегда сопровождается γ-излучением. В отдельных случаях, кроме γ-излучения при «успокоении» метастабильного ядра, имеет место испускание электронов или позитронов, а также электронов *конверсии*, возникающих в процессе прямой передачи энергии от возбужденного ядра к электронной оболочке.

Изомерный переход связан с явлением ядерной изомерии, проявляющейся в существовании радиоактивных ядер, одинаковых по числу Менделеева *Z* и по атомному весу *A*, но находящихся в разном энергетическом состоянии и отличающихся между собою по периоду полураспада.

Первая пара изомерных ядер была открыта в 1921 г. Ганом. Он обнаружил радиоактивное вещество UZ ($_{91}Pa^{234}$), в точности совпадающее по номеру и массе с изотопом UX_2, но отличающееся от него радиоактивными

свойствами. Оба изомера получаются с разной вероятностью P в результате β^--распада одного и того элемента UX_1 ($_{90}Th^{234}$):



и состоят из одинаковых ядер, но имеют разные периоды полураспада.

Разобраться в природе этого явления помогли опыты Курчатова и его сотрудников, открывших в 1935 г. существование изомерии у искусственно-радиоактивных ядер. В частности, искусственно-радиоактивный изотоп брома $_{35}Br^{80}$ характеризуется двумя периодами полураспада: 18 мин и 4,4 ч. Существование у одного ядра двух периодов полураспада можно понять, если предположить, что ядро $_{35}Br^{80}$ может возникать в двух изомерных состояниях: основном и возбужденном долгоживущем (метастабильном).

Стабильный (материнский) изотоп золота $_{79}Au^{197}$ в результате бомбардировки γ-квантами образует по ядерной реакции (γ, γ′) дочерний продукт $_{79}Au^{197m}$ (метастабильный), который в отличие от материнского является радиоактивным с периодом полураспада 7,2 с. Изомерный переход ядер $_{79}Au^{197m}$ в основное состояние происходит путем испускания γ-квантов с энергий 279 кэВ. Регистрируя интенсивность γ-излучения, связанного с изомером $_{79}Au^{197m}$, оказывается возможной быстрая и надежная идентификация золота в исследуемых пробах.

1.3.4. Деление ядер

Термин «деление» (*f-распад*) применяется к процессам, когда атомное ядро, захватив нейтрон, расщепляется (делится) на две части (осколки деления), между которыми распределяются нуклоны исходного ядра (например, $_{92}U^{235}$): $Z_U = Z_1 + Z_2$; $A_U \cong A_1 + A_2$. Соотношение масс осколков деления может варьировать в широких пределах, но наиболее вероятное значение A_1/A_2 (или A_2/A_1) близко к 2 (0,5).

При делении тяжелого ядра высвобождается большая энергия. Этот вывод следует из сравнения масс делящегося ядра A_U и масс образующихся осколков A_1 и A_2. Величину выделяющейся энергии Q_U можно оценить, имея в виду удельную энергию связи осколков $\bar{\varepsilon}$ и параметр ε для урана:

$$Q_U = \Delta\varepsilon A,$$

где $\Delta\varepsilon = \bar{\varepsilon} - \varepsilon$; A – массовое число делящегося ядра.

Так как ε для ядер середины периодической системы примерно на 0,8 МэВ больше, чем ε для $_{92}U^{235}$, получим: $Q_U = 235 \cdot 0{,}8 \approx 200$ МэВ.

Подавляющая часть энергии деления проявляется в виде кинетической энергии осколков деления Q_f. Образующиеся при делении осколки являются радиоактивными (β-излучателями) и могут испускать *нейтроны деления*. Последнее обстоятельство определяет то, что процесс деления при определенных условиях может стать самоподдерживающимся с непрерывным выделением энергии. В этом и состоит основной принцип получения атомной энергии. Важнейшими материалами, испытывающими деление, являются: $_{92}U^{235}$, $_{92}U^{233}$ и $_{94}Pu^{239}$. Частицы с очень высокими энергиями могут вызывать деление и в других материалах (например, ядра $_{92}U^{238}$ делятся при их облучении быстрыми нейтронами).

В результате деления ядра испускаются *мгновенные* и *запаздывающие* нейтроны. Первые из них составляют ~99 % всех нейтронов деления и испускаются в течение 10^{-14} с за пределы ядра после акта деления. Большая часть мгновенных нейтронов имеет энергию от 1 до 2 МэВ, а распределение их по энергиям называется *спектром нейтронов деления*. Запаздывающие нейтроны испускаются с задержкой до нескольких секунд со спадающей интенсивностью. Запаздывающие нейтроны представляют особый интерес с точки зрения управления цепной реакцией. Регистрация запаздывающих нейтронов лежит в основе одного из методов количественного определения $_{92}U^{235}$ в природных средах.

Механизм деления обычно объясняется с помощью *капельной модели* ядра [41]. Схема деления ядра $_{92}U^{235}$ может быть представлена следующим образом:

$$_{92}U^{235} + {}_{0}n^{1} \rightarrow {}_{92}U^{236} \rightarrow {}_{54}Xe^{140} + {}_{38}Sr^{94} + 2\,{}_{0}n^{1} + \gamma.$$

Осколки деления являются β-излучателями. В частности, $_{54}Xe^{140}$ испытывает следующую цепочку β-превращений:

$$_{54}Xe^{140} \rightarrow {}_{55}Cs^{140} \rightarrow {}_{56}Ba^{140} \rightarrow {}_{57}La^{140} \rightarrow {}_{58}Ce^{140}\ \text{(стабильный)}.$$

Как впервые показали Петржак и Флеров, ядра урана способны делиться не только под действием нейтронов, но и сами по себе, самопроизвольно, без внешнего воздействия (так называемого *спонтанное* деление).

Основные закономерности распространения изотопов

Большинство известных изотопов неустойчиво, но из 340 ядер, находящихся в природе, 273 относятся к стабильным, из которых очень небольшая часть обладает крайне слабой радиоактивностью.

Все известные нуклиды могут быть разделены на четыре типа в зависимости от четного или нечетного числа протонов и нейтронов в их

составе: четно-четный $_8O^{16}$ (известно 166 нуклидов), четно-нечетный $_4Be^9$ (55), нечетно-четный $_3Li^7$ (47), нечетно-нечетный $_5B^{10}$ (5). Из этих данных видно, что изотопы с четным Z и $N = A - Z$ преобладают над изотопами с нечетными Z и N. В то же время четно-четные ядра в природе наиболее распространены и наиболее стабильны. К ним относятся шесть изотопов: $_2He^4$, $_8O^{16}$, $_{12}Mg^{16}$, $_{14}Si^{28}$, $_{20}Ca^{40}$, $_{26}Fe^{56}$, пять из которых входят в число восьми главных химических элементов, слагающих верхнюю часть литосферы. Ядра с четным A более многочисленны, чем с нечетным A. Всего известно пять стабильных изотопов нечетно-нечетного типа: $_1H^2$, $_3Li^6$, $_5B^{10}$, $_7N^{14}$, $_{25}V^{50}$. Все остальные известные нечетно-нечетные ядра с $A > 14$ (включая $_{19}K^{40}$) β-радиоактивны.

Все тяжелые изотопы с $Z > 83$ радиоактивны, многие из них испытывают α-распад. Они группируются в четыре радиоактивных ряда: ториевый, нептуниевый, урановый и актиноурановый (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Четыре типа радиоактивных рядов

Ряд	Родоначальник ряда	Конечный продукт	Признак делимости на 4	Тип ядра
Ториевый	$_{90}Th^{232}$	$_{82}Pb^{208}$	$4n$	Четно-четный
Нептуниевый	$_{93}Np^{237}$	$_{83}Bi^{209}$	$4n + 1$	Нечетно-четный
Урановый	$_{92}U^{238}$	$_{82}Pb^{206}$	$4n + 2$	Четно-четный
Актиноурановый	$_{92}U^{235}$	$_{82}Pb^{207}$	$4n + 3$	Четно-нечетный

В современную эпоху на Земле отсутствует нептуниевый ряд. Родоначальник этого ряда $_{93}Np^{237}$ получен искусственным путем.

На основании астрофизических данных по составу звездных атмосфер были получены данные о космическом (галактическом) распространении элементов и их изотопов [60] (рис. 1.3). Зависимость между распространением элемента и Z выражается следующими закономерностями:

1. Распространенность химических элементов с четным Z в общем более высокая, чем у элементов с нечетным Z. Эта закономерность получила название *правила Оддо-Гаркинса*.

2. Распространенность легких элементов с атомным номером $Z < 28$ резко преобладает над распространенностью остальных, более тяжелых элементов, за исключением Li, Be, B.

3. Существуют так называемого *магические числа*: 2, 8, 20, 50, 82, 126, относящиеся как к числу нейтронов, так и протонов в ядре.

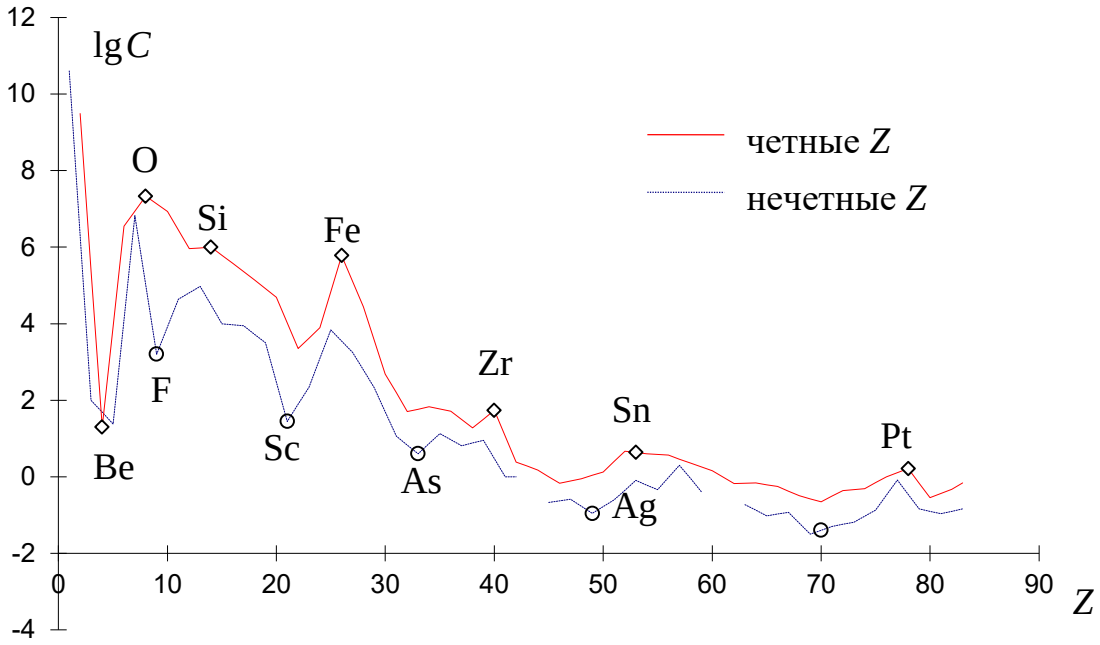


Рис. 1.3

Нуклиды с этими характеристиками обладают наибольшей прочностью (удельной энергией связи нуклонов в ядре) и повышенным распространением.

1.4. Законы радиоактивных превращений

1.4.1. Закон распада

На основании экспериментальных исследований Резерфорд и Содди в 1903 г. показали, что при радиоактивном распаде проявляется общая для всех радионуклидов закономерность, заключающаяся в том, что *количество атомов данного радиоактивного изотопа, распадающихся в среднем в единицу времени, всегда составляет определенную, характерную для данного радионуклида долю от полного числа еще не распавшихся ядер.* Математически это записывается следующим образом:

$$-\Delta N = \lambda N \Delta t, \qquad (1.7)$$

где ΔN – число атомов, распадающихся за время между t и Δt;

N – число атомов еще не распавшихся к моменту времени t;

λ – *постоянная распада*, характеризующая вероятность ядерного превращения, отнесенная к одному ядру в единицу времени.

В форме дифференциального уравнения выражение (1.7) записывается так:

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N . \qquad (1.8)$$

Из соотношения (1.8) видно, что количество ядерных превращений, происходящих в активном препарате, пропорционально начальному количеству радиоактивных ядер. Перепишем (1.8) в следующим виде:

$$\frac{dN}{dt} + \lambda N = 0, \text{ или } \frac{dN}{N} + \lambda dt = 0. \qquad (1.9)$$

Интегрируя (1.9), имеем:

$\ln N + \lambda t = A.$

Постоянную интегрирования A найдем из начального условия: $t = 0$, $N(0) = N_0$. С учетом отмеченного, получим:

$\ln N + \lambda t = \ln N_0$, откуда

$$N(t) = N_0 \exp(-\lambda t). \qquad (1.10)$$

Соотношение (1.10) носит название *закона радиоактивного распада*.

Найдем время T, по истечении которого распадается половина от исходного количества ядер N_0. Полагая $N(t)/N_0 = 0{,}5$, имеем:

$0{,}5 = e^{-\lambda T}$, откуда $T = \dfrac{\ln 2}{\lambda}$.

Параметр T имеет размерность времени и носит название *периода полураспада*. Отношение $N(t)/N_0$ часто называют *функцией выживания*. Учитывая связь между λ и T, запишем для функции выживания:

$$\frac{N(t)}{N_0} = \exp\left(-\ln 2 \frac{t}{T}\right).$$

Обозначим $k = t/T$, тогда

$$g(k) = \frac{N(k)}{N_0} = 2^{-k}. \qquad (1.11)$$

Выражение (1.11) представляет одну из форм записи закона распада. На рис. 1.4 представлено поведение функции выживания в зависимости от параметра k, представляющего собою время распада в нормировке к периоду полураспада данного радионуклида.

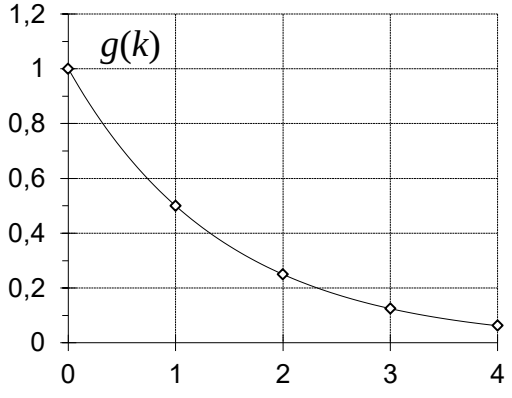


Рис. 1.4

Если зависимость (1.11) построить в полулогарифмическом мас-

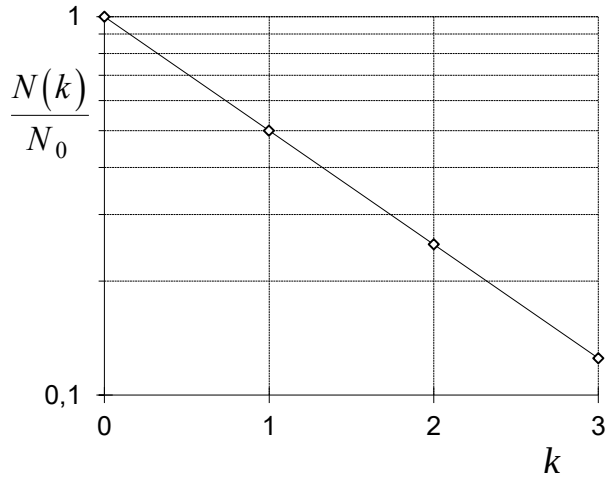


Рис. 1.5

штабе, откладывая по ординате функцию выживания N/N_0, а по оси абсцисс – время в линейном масштабе, то будем иметь дело с линейной зависимостью (рис. 1.5). Угловой коэффициент функции $f(k) = \ln(N/N_0)$ зависит от T. Если в радиоактивном препарате присут-ствуют не один, а несколько радио-нуклидов, например *1* и *2*, отличающихся между собою по периоду полураспада T, то результирующая функция *3* в полулогарифмическом масштабе будет отличаться от прямой (рис. 1.6). Получение отдельных (парциальных) зависимостей в таких случаях возможно графическим путем лишь для двух, иногда трех изотопов с контрастными периодами полураспада (отличающихся в нес-колько р

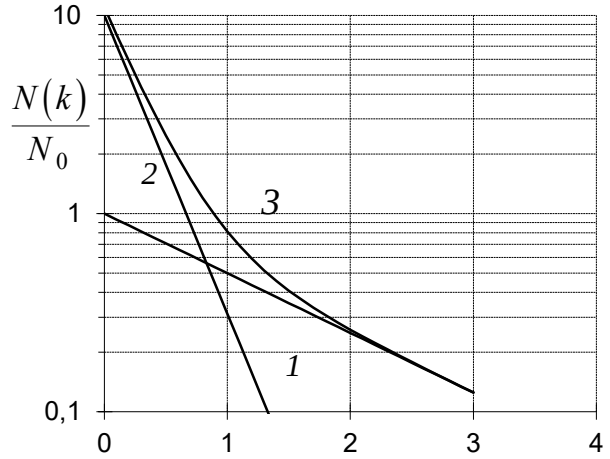


Рис. 1.6

Если функция $N(t)$ известна, например, получена по данным измерений активности радионуклида во времени, то его период полураспада может быть найден из следующей зависимости:

$$T = \ln 2\left(\ln a_1 - \ln a_2\right)^{-1}\Delta t, \qquad (1.12)$$

где a_1, a_2 - активности (или аппаратурные параметры), соответствующие моментам времени t_1 и t_2, а $\Delta t = t_2 - t_1$.

Численные значения периодов полураспада для естественно-радиоактивных элементов изменяются в очень больших пределах – от $1{,}40\cdot10^{10}$ лет для ${}_{90}Th^{232}$ до $2{,}09\cdot10^{-7}$ с для ThC′ (${}_{84}Po^{212}$).

Понятие о средней продолжительности жизни атомов

Ядра радионуклидов распадаются стохастически (случайно), независимо друг от друга, поэтому о времени жизни каждого отдельного ядра любого изотопа можно сказать, что это время меняется от нуля до бесконечности. Однако средняя продолжительность жизни большой группы атомов любого из

радионуклидов является определенной и устойчивой величиной, связанной с постоянной распада.

Допустим, что на некотором отрезке времени *dt* распалось *dN* ядер данного радионуклида. Тогда произведение *tdN* будет представлять собою суммарное время жизни всех ядер некоторой выборки *dN*, существующих в течение времени *t*, вплоть до отрезка *t* + *dt*. Если исходное количество ядер обозначить через N_0 и предположить, что любая сколь угодно малая выборка ядер может существовать неограниченное время от 0 до ∞, то для среднего времени жизни τ группы атомов N_0 можно записать:

$$\tau = \frac{1}{N_0}\int_0^{N_0} t dN \text{, или} \tag{1.13}$$

$$\tau = \frac{1}{N_0}\int_0^{\infty} t\lambda N dt = \int_0^{\infty} t\lambda e^{-\lambda t} dt . \tag{1.14}$$

Интеграл (1.14) легко берется по частям, поэтому, опуская промежутки, запишем:

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{T}{\ln 2} \cong 1{,}44T . \tag{1.15}$$

Из-за статистического характера радиоактивного распада законы радиоактивных превращений выполняются строго лишь для очень большого количества распадающихся ядер *N*. При малых *N* наблюдаются отклонения от этих законов, называемые (статистическими) *флуктуациями*. Отклонение числа распадов *n* от среднего значения $\overline{N}$ подчиняется закону *распределения Пуассона*, согласно которому при большом количестве наблюдений распределение вероятностей *p*(*n*) того, что за определенный промежуток времени будет зарегистрировано *n* распадов, описывается выражением

$$p(n) = \frac{\overline{N}^{\,n}}{n!}\, e^{-\overline{N}} . \tag{1.16}$$

При достаточно большом количестве ядер (на практике для $n \geq 30$), распадающихся за данный промежуток времени, пуассоновское дискретное распределение вероятностей *p*(*n*) может быть описано через непрерывное *распределение Гаусса* с дисперсией $\overline{N}$:

$$p(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\overline{N}}} \exp\left[-\frac{\left(n - \overline{N}\right)^2}{2\overline{N}} \right]. \tag{1.17}$$

Величина среднеквадратического отклонения σ_n, характеризующая разброс значений *n* относительно среднего $\overline{N}$, рассчитывается по формуле

$$\sigma_n = \pm\sqrt{\overline{N}}\,. \qquad (1.18)$$

В соответствии с этим относительное среднеквадратическое отклонение δ_n определяется выражением

$$\delta_n = \frac{\sigma_n}{\overline{N}} = \frac{1}{\sqrt{\overline{N}}}. \qquad (1.19)$$

При использовании формул (1.18) и (1.19) следует иметь в виду, что они определяют лишь вероятность, а не возможность флуктуации. Около 30 % от числа распавшихся атомов отклоняются от среднего значения на величину, большую, чем σ_n, причем 4,5 % их них на величину $2\sigma_n$, а 0,3 % – на величину $3\sigma_n$.

Закономерности (1.16) - (1.19) справедливы как для распадающихся ядер, так и для аппаратурных параметров (например скорость счета импульсов), зарегистрированных любым детектором ядерных частиц.

1.4.2. Последовательные ядерные превращения

В ряде случаев при распаде ядер исходного (материнского) элемента, родоначальника радиоактивного семейства, образуются атомы другого (дочернего) элемента, которые также являются радиоактивными и при ядерном превращении дают начало третьему элементу и т. д. Другими словами, образуется цепочка последовательных превращений типа

$$N_1(t) \rightarrow N_2(t) \rightarrow ... \rightarrow N_{n\text{-}1}(t) \rightarrow N_n(t),$$

которая заканчивается образованием стабильных ядер. Если известно исходное количество ядер материнского элемента N_{01}, а также постоянные распада радионуклидов цепочки, то можно найти количество любого из дочерних продуктов в любой момент времени.

Вначале рассмотрим **случай двух веществ**. Допустим, что мы имеем дело с бинарной цепочкой

$$N_1(t) \rightarrow N_2(t).$$

Если обозначить через λ_1 и λ_2 постоянные распада материнского и дочернего радионуклида, то прирост дочерних ядер dN_2 за время dt составит

$$dN_2 = \lambda_1 N_1 dt - \lambda_2 N_2 dt\,, \qquad (1.20)$$

откуда скорость прироста составит

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2\,. \qquad (1.21)$$

Перепишем (1.21) с учетом того, что $N_1(t) = N_{01}\exp(-\lambda_1 t)$:

$$\frac{dN_2}{dt} + \lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_{01} \exp(-\lambda_1 t). \qquad (1.22)$$

Будем искать функцию $N_2(t)$, имея в виду, что при $t = 0$, $N_1(0) = N_{01}$. Обычным приемом при решении уравнений типа (1.22) является нахождение решения в виде суммы

$$N_2(t) = N_2'(t) + N_2''(t), \qquad (1.23)$$

где $N_2'(t)$ – общее, $N_2''(t)$ – частное решение уравнения (1.22).

Полагая нулю правую часть (1.22), имеем для общего решения:

$$N_2'(t) = A \exp(-\lambda_2 t).$$

Частное решение обычно ищется в соответствии со структурой правой части дифференциального уравнения. В нашем случае:

$$N_2''(t) = B \exp(-\lambda_1 t).$$

Будем искать постоянные интегрирования A и B. Поскольку частное решение обязано удовлетворять исходному дифференциальному уравнению (1.22), то можно записать:

$$-\lambda_1 B \exp(-\lambda_1 t) + \lambda_2 B \exp(-\lambda_1 t) = \lambda_1 N_{01} \exp(-\lambda_1 t). \qquad (1.24)$$

Из (1.24) легко находится постоянная интегрирования:

$$B = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{01}.$$

Постоянную A найдем из начального условия. Поскольку при $t = 0$ $N_2(0) = 0$ (процесс распада материнских ядер еще не начался), то, имея в виду (1.23), получим:

$$A + B = 0, \text{ откуда } A = -B = -\frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{01}.$$

С учетом полученного запишем выражение для искомой функции $N_2(t)$:

$$N_2(t) = \frac{\lambda_1 N_{01}}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[\exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t)\right]. \qquad (1.25)$$

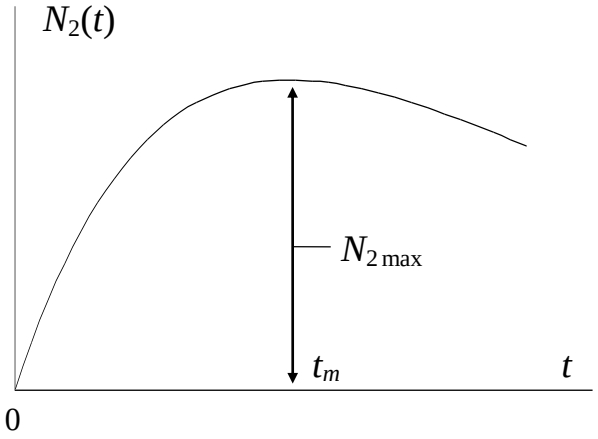


Рис. 1.7

Элементарный анализ формулы (1.25) убеждает, что функция $N_2(t)$ в нуле и в бесконечности оказывается равной нулю, поэтому в соответствии с *теоремой Ролля* она должна иметь экстремум (максимум), рис. 1.7. Решая задачу на максимум, имеем:

$\frac{d}{dt}\left[N_2(t)\right]=0$, откуда

$-\lambda_1 \exp(-\lambda_1 t_m)+\lambda_2 \exp(-\lambda_2 t_m)=0$, и

$$t_m=\frac{\ln\lambda_2-\ln\lambda_1}{\lambda_2-\lambda_1}. \qquad (1.26)$$

Рассмотрим поведение $N_2(t)$ для частного случая, когда период полураспада материнского изотопа оказывается много больше периода полураспада дочернего продукта, т. е. $\lambda_1 << \lambda_2$. С учетом отмеченного неравенства формулу (1.25) можно переписать:

$$N_2(t)=\frac{\lambda_1}{\lambda_2}N_{01}\exp(-\lambda_1 t)\left[1-\exp(-\lambda_2 t)\right], \text{ или} \qquad (1.27)$$

$$\lambda_2 N_2(t)=\lambda_1 N_1(t)\left[1-\exp(-\lambda_2 t)\right],\ \lambda_1 << \lambda_2. \qquad (1.28)$$

Произведение $A = \lambda N$ определяет *абсолютную активность* данного радиоактивного препарата или количество ядерных превращений, происходящих в нем за единицу времени. Обозначив активность материнского и дочернего продуктов через $A_1(t)$ и $A_2(t)$, получим:

$$A_2(t)=A_1(t)\left[1-\exp(-\lambda_2 t)\right]. \qquad (1.29)$$

Рассмотрим поведение функции $A_2(t)$ в начальные моменты времени (до достижения t_m), например, когда $t < T_2$ или $t << T_1$. В этом случае произведение $N_{01}\exp(-t\ \ln 2/T_1) \approx N_{01}$, т. е. количество ядер материнского изотопа за промежуток времени, много меньший, чем его период полураспада, практически не изменяется. Обозначим через $A_0 = \lambda_1 N_{01}$ начальную активность материнского вещества, тогда

$$\frac{A_2(t)}{A_0}=1-\exp(-\lambda_2 t). \qquad (1.30)$$

Другими словами, в начальные моменты времени (до достижения максимума) накопление дочерних ядер происходит пропорционально *функции накопления* $f(t) = 1 - \exp(-\lambda_2 t)$ с постоянной распада короткоживущего дочернего продукта, т. е. накопление дочернего вещества происходит достаточно быстро.

В моменты времени после достижения $N_2(t)$ максимума, например, когда $t > T_1$ или $t >> T_2$, непосредственно из (1.27) вытекает, что

$$A_2(t) = \lambda_1 N_{01} \exp(-\lambda_1 t). \qquad (1.31)$$

Другими словами, уменьшение активности дочернего продукта (после достижения максимума) происходит пропорционально *функции остывания* $f(t) = \exp(-\lambda_1 t)$ с постоянной распада долгоживущего материнского вещества, т. е. относительно медленно.

Можно показать, что процесс накопления дочерних ядер всегда происходит быстро (с постоянной распада короткоживущего нуклида), а уменьшение едет медленно, т. е. с постоянной распада долгоживущего нуклида, вне зависимости от того, материнский это изотоп или дочерний.

Понятие о радиоактивном равновесии

Если в дифференциальном уравнении (1.21) левую часть принять равной нулю, то получим следующее равенство:

$$\lambda_1 N_1(t) = \lambda_2 N_2(t). \qquad (1.32)$$

Соотношение (1.32) характеризует состояние *радиоактивного равновесия*, наступающего по достижении максимума функции $N_2(t)$. Радиоактивное равновесие свидетельствует о равенстве активностей материнского и дочернего продуктов, при этом количество тех и других ядер меняется во времени, сохраняется постоянным лишь их отношение

$$\frac{N_2(t)}{N_1(t)} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \text{const}. \qquad (1.33)$$

Различают *подвижное* и *устойчивое* (*вековое*) состояния радиоактивного равновесия. Допустим, что продолжительность жизни материнского вещества больше времени жизни любого из дочерних продуктов цепочки последовательных превращений, но пренебречь распадом («остыванием») материнского вещества нельзя. В этом случае по истечении достаточно длительного промежутка времени количество каждого из последующих продуктов превращения изменится по закону распада материнского вещества и отношение между количеством материнского изотопа и количеством

последующих продуктов распада будет приближаться к постоянному предельному значению.

Рассмотренный выше случай относится к так называемого подвижному равновесию, что имеет место, например, при установления равновесия между Rn (T = 3,825 суток) и его дочерними продуктами распада RaA, RaB и RaC. При малых периодах полураспада указанные продукты быстро достигают состояния радиоактивного равновесия с материнским веществом. Так, RaA (T = 3,05 мин.) приходит в состояние равновесия с Rn практически через 12-15 минут, а ThA (T = 0,16 с) практически всегда находится в равновесии с тороном (T = 54,5 с). То же самое относится к AcA (T = $1{,}08\cdot10^{-3}$ с), находящемуся в равновесии с актиноном (T = 3,9 с).

Если материнское вещество распадается настолько медленно, что его остыванием можно пренебречь, то во всей цепочке последовательных превращений по истечении достаточного времени наступит состояние, называемое устойчивым (вековым) равновесием. Накопление любого продукта цепочки будет происходить до тех пор, пока число его распадающихся ядер в единицу времени не окажется равным числу распадающихся в единицу времени ядер материнского вещества. Теоретически такое состояние может быть достигнуто через бесконечно большой промежуток времени, практически же он достигается за такой конечный отрезок, когда прирост ядер дочернего продукта уже нельзя заметить опытом. По достижении в радиоактивном ряду состояния устойчивого равновесия количество распадающихся в единицу времени атомов любого радионуклида цепочки становится одинаковым, т. е.

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \ldots = \lambda_n N_n = \text{const}. \qquad (1.34)$$

Из (1.34) видно, что при устойчивом радиоактивном равновесии число атомов N_1, N_2, ..., N_n пропорционально их периодам полураспада.

Число ядер радионуклида, соответствующее активности 1 расп/с, можно оценить как $N = 1/\lambda$, а масса вещества в грамм, излучающая эту активность, составляет:

$$m = N\frac{A}{N_A} = \frac{A}{\lambda N_A} = \frac{A}{N_A}\frac{T}{\ln 2},$$

где N_A – число Авогадро; A – атомный вес радионуклида.

О радиоактивном равновесии между U и Ra

Радиоактивное равновесие между ураном и радием наступает по истечении длительного промежутка времени и наблюдается в древних хорошо сохранившихся породах и минералах. Имея в виду (1.32), оценим количество Ra, находящегося в равновесии с одним граммом U. Полагая массу урана

равной 1 г, а периоды полураспада $_{92}U^{238}$ и $_{88}Ra^{226}$ равными $4{,}47\cdot10^9$ и 1602 лет, соответственно, получим:

$$m_{Ra} = m_U \frac{\lambda_U}{\lambda_{Ra}} \frac{A_{Ra}}{A_U}, \qquad (1.35)$$

где A_{Ra}, A_U – массовые числа радия и урана.

Из (1.35) следует, что один грамм U соответствует активности (количеству распадов в единицу времени) $3{,}4\cdot10^{-7}$ г Ra, т. е. из трех тонн равновесного U можно извлечь примерно один грамм Ra.

Происходящие в природе процессы растворения и выщелачивания радиоактивных элементов из горных пород и минералов приводят к нарушениям радиоактивного равновесия и, в частности, вызывают смещение равновесия между Ra и U. В этом случае степень смещения равновесия выражается в % и определяется соотношением

$$K_{рр} = \frac{\alpha}{\alpha_0} 100\,\%, \text{ или} \qquad (1.36)$$

$$K_{рр} = \frac{Q_{Ra}}{Q_U} \frac{100\,\%}{3{,}4\cdot10^{-7}},$$

где α – отношение Ra к U в исследуемом образце;

α_0 – равновесное соотношение между Ra и U ($3{,}4\cdot10^{-7}$);

Q_{Ra}, Q_U – содержания Ra и U в исследуемом образце.

Если $\alpha > \alpha_0$, то говорят о смещении равновесия в сторону Ra; при $\alpha < \alpha_0$ – в сторону U; если $\alpha = \alpha_0$ – равновесной руде.

Отношение (1.36) называется *коэффициентом радиоактивного равновесия* между Ra и U и может меняться от 0 до ∞. Сведения о состоянии радиоактивного равновесия имеют важное значение при интерпретации результатов γ-измерений, например при количественных определениях U по результатам γ-каротажа.

Случай трех веществ

Допустим, что имеется цепочка последовательных превращений

$N_1(t) \rightarrow N_2(t) \rightarrow N_3(t)$.

Атомы 3-го вещества образуются за счет распада 2-го вещества, который, в свою очередь, возникает за счет распада материнских ядер.

Будем считать, что в начальный момент времени $t = 0$, $N_1(0) \neq 0$, $N_2(0) = 0$, $N_3(0) = 0$. Требуется найти выражение для функции $N_3(t)$, т. е. количество ядер третьего продукта в любой момент времени. Скорость прироста ядер 3-го элемента можно записать следующим образом:

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3, \text{ или} \tag{1.37}$$

$$\frac{dN_3}{dt} + \lambda_3 N_3 = \lambda_2 N_2. \tag{1.38}$$

Имея в виду, что количество ядер N_2 зависит от времени и определяется формулой (1.25), получим:

$$\frac{dN_3}{dt} + \lambda_3 N_3 = \frac{\lambda_1 \lambda_2 N_{01}}{\lambda_2 - \lambda_1}\left[\exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t)\right]. \tag{1.39}$$

Будем искать функцию $N_3(t)$ в виде суммы

$$N_3(t) = N_3'(t) + N_3''(t), \tag{1.40}$$

где $N_3'(t)$ – общее, $N_3''(t)$ – частное решение уравнения (1.39).

Полагая нулю правую часть (1.39), получим для общего решения:

$$N_3'(t) = A\exp(-\lambda_3 t).$$

Частное решение будем искать в виде, соответствующем структуре правой части уравнения. В нашем случае:

$$N_3''(t) = B\exp(-\lambda_1 t) + C\exp(-\lambda_2 t).$$

Поскольку частное решение обязано удовлетворять исходному дифференциальному уравнению, то, учитывая, что

$$\frac{dN_3''}{dt} = -\lambda_1 B\exp(-\lambda_1 t) - \lambda_2 C\exp(-\lambda_2 t), \text{ имеем:}$$

$$B(\lambda_3 - \lambda_1)\exp(-\lambda_1 t) - C(\lambda_3 - \lambda_1)\exp(-\lambda_2 t) = \frac{\lambda_1 \lambda_2 N_{01}}{\lambda_2 - \lambda_1}\left[\exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t)\right],$$

откуда легко находятся постоянные интегрирования B и C:

$$B = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)} N_{01},\ C = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)} N_{01}.$$

Постоянную интегрирования A найдем, имея в виду начальное условие. Считая, что при $t = 0$, $N_3(0) = 0$, получим из (1.40): $A + B + C = 0$, откуда легко показать, что

$$A = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)} N_{01}.$$

Подставляя выражения для постоянных A, B и C в (1.40), имеем:

$$N_3(t) = \lambda_1\lambda_2 N_{01}\left[\frac{\exp(-\lambda_1 t)}{(\lambda_2-\lambda_1)(\lambda_3-\lambda_1)} + \frac{\exp(-\lambda_2 t)}{(\lambda_1-\lambda_2)(\lambda_3-\lambda_2)} + \frac{\exp(-\lambda_3 t)}{(\lambda_1-\lambda_3)(\lambda_2-\lambda_3)}\right]. \quad (1.41)$$

Обобщение на случай *n* веществ

Пусть имеется цепочка ядерных превращений типа

$N_1(t) \to N_2(t) \to ... \to N_{n-1}(t) \to N_n(t)$.

Будем считать, что в начальный момент времени $t = 0$, $N_1(0) \neq 0$, $N_2(0) = N_3(0) = ... = N_n(0) = 0$. Имея в виду особенности правых частей функций $N_2(t)$ и $N_3(t)$, формулы (1.25) и (1.41), запишем для $N_n(t)$:

$$N_n(t) = \lambda_1\lambda_2...\lambda_{n-1} N_{01}\left[\frac{\exp(-\lambda_1 t)}{(\lambda_2-\lambda_1)(\lambda_3-\lambda_1)...(\lambda_n-\lambda_1)} + \right.$$

$$\left.\frac{\exp(-\lambda_2 t)}{(\lambda_1-\lambda_2)(\lambda_3-\lambda_2)...(\lambda_n-\lambda_2)} + ... + \frac{\exp(-\lambda_n t)}{(\lambda_1-\lambda_n)(\lambda_2-\lambda_n)...(\lambda_{n-1}-\lambda_n)}\right]. \quad (1.42)$$

Если период полураспада первого (материнского) вещества является наибольшим, то по истечении достаточно длительного времени в цепочке из n веществ устанавливается состояние радиоактивного равновесия либо подвижное, либо вековое. В первом случае количество каждого нуклида уменьшается пропорционально остыванию материнского вещества:

$$\lim\frac{N_n}{N_1} = \frac{\lambda_1\lambda_2...\lambda_{n-1}}{(\lambda_2-\lambda_1)(\lambda_3-\lambda_1)...(\lambda_n-\lambda_1)}. \quad (1.43)$$

Если же период полураспада материнского (1-го) вещества оказывается настолько большим, что $\lambda_1 << \lambda_2$, $\lambda_1 << \lambda_3$, ..., $\lambda_1 << \lambda_n$, то в этом случае между материнским и дочерними радионуклидами устанавливается вековое равновесие, которое характеризуется равенством активностей:

$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = ... = \lambda_n N_n$.

Радиоактивное равновесие в цепочке последовательных превращений практически наступает спустя время, на порядок превышающее период полураспада дочернего радионуклида с наибольшим временем жизни.

1.5. Естественные радиоактивные элементы

Систематическое изучение радиоактивности природных сред показало, что в любой горной породе содержатся (в разных количествах) радиоактивные изотопы тяжелых элементов с числами Менделеева от 81 до 92.

К числу естественных радиоактивных элементов (ЕРЭ), все изотопы которых являются неустойчивыми, относятся элементы от $_{84}$Po до $_{92}$U. Встречающиеся в природе $_{81}$Tl, $_{82}$Pb, $_{83}$Bi содержат в своем составе радиоактивные изотопы. Имеются радиоактивные изотопы и у других элементов средней части таблицы Менделеева.

Таблица 1.2

Ядерные характеристики одиночных естественных радионуклидов

Изотоп	Отн. распростр., %	Период полураспада	Схема распада	Дочернее ядро	Энергия излучений, МэВ
$_{19}K^{40}$	0,0119	$1{,}27\cdot10^{9}$ лет	β^--распад (89%) *K-захват* (11%)	$_{20}Ca^{40}$ $_{19}Ar^{40}$	β_m - 1,325 γ - 1,460
$_{37}Rb^{87}$	27,5	$4{,}7\cdot10^{10}$ лет	β^--распад	$_{38}Sr^{87}$	β_m - 0,274 γ - 0,394
$_{49}In^{115}$	95,72	$6{,}0\cdot10^{14}$ лет	β^--распад	$_{49}Sn^{115}$	β_m - 0,6
$_{57}La^{138}$	0,089	$1{,}1\cdot10^{11}$ лет	β^--распад (6%) *K-захват* (94%)	$_{58}Ce^{138}$ $_{56}Ba^{138}$	β_m - 1,0 γ - 0,81, 1,43
$_{62}Sm^{147}$	14,97	$1{,}2\cdot10^{11}$ лет	α-распад	$_{60}Nd^{143}$	α - 2,18
$_{71}Lu^{176}$	2,59	$2{,}1\cdot10^{10}$ лет	β^--распад (33%) *K-захват* (67%)	$_{72}Hf^{176}$ $_{70}Yb^{176}$	β_m - 0,43 γ - 0,19, 0,31
$_{75}Re^{187}$	66,93	$1{,}2\cdot10^{11}$ лет	β^--распад	$_{76}Os^{187}$	$\beta_m < 0{,}008$ γ - нет
$_{78}Pt^{190}$	0,012	$6{,}9\cdot10^{11}$ лет	α-распад	$_{76}Os^{186}$	α - 3,3

В 1906 г. Кэмпбелл и Вуд обнаружили слабую β^--активность у калия и рубидия, которая не была обусловлена какими-либо примесями, поскольку оказалась пропорциональной массовой доле элемента. Впоследствии выяснилось, что радиоактивность К связана с присутствием в его составе малораспространенного изотопа $_{19}K^{40}$, распадающегося по схеме β^-- и *K*-захвата. Радиоактивным изотопом рубидия оказался $_{37}Rb^{87}$, испускающий β^--частицы. Известны и другие радионуклиды, встречающиеся в земной коре, их основные свойства приведены в табл. 1.2.

1.5.2. Ядерная геохронология

Особенности ядерных превращений широко используются в приложениях, в частности для определения абсолютного возраста горных

пород. Известно, что в любой горной породе можно обнаружить даже самые микроскопические количества любого химического элемента, включая и естественно-радиоактивные.

Допустим, что начальное количество ядер некоторого радионуклида в заданном образце горной породы составляет N_0 ядер. Если установлено, что за прошедший период этот радионуклид не выносился или дополнительно не поступал в исследуемую породу, то, зная постоянную распада радионуклида и соотношение начального N_0 и конечного количества N ядер, можно вычислить время t, которое потребовалось для этого соотношения.

Конечное (существующее на момент датировки) содержание радионуклида определяется аналитически (химия, радиохимия, γ-спектрометрия и др. методы анализа). О начальном содержании N_0 судят по количеству накопившегося в породе стабильного изотопа $N_{ст}$, являющегося конечным продуктом распада исходного радионуклида. При этом используется то обстоятельство, что начальное содержание радионуклида может быть представлено в виде суммы его концентрации N на момент исследований и содержания $N_{ст}$ – продукта распада, т. е.

$$N_0 = N + N_{ст}. \qquad (1.44)$$

Учитывая, что $N = N_0 \exp(-\lambda t)$, имеем:

$$\frac{N_{ст}}{N} = \exp(\lambda t) - 1, \text{ откуда} \qquad (1.45)$$

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln\left(1 + \frac{N_{ст}}{N}\right). \qquad (1.46)$$

Первые методы определения абсолютного возраста были основаны на использовании цепочки последовательных превращений U, Th и актиноурана в соответствующие стабильные изотопы $_{82}Pb^{206}$, $_{82}Pb^{208}$ и $_{82}Pb^{207}$:

$$\begin{cases} {}_{92}U^{238} \rightarrow 8\,{}_{2}He^{4} + {}_{82}Pb^{206}; \\ {}_{92}U^{235} \rightarrow 7\,{}_{2}He^{4} + {}_{82}Pb^{207}; \\ {}_{90}Th^{232} \rightarrow 6\,{}_{2}He^{4} + {}_{82}Pb^{208}. \end{cases} \qquad (1.47)$$

В результате этих реакций образуется He и изотопы Pb в зависимости от того, по какому из указанных конечных продуктов распада определяется возраст, метод соответственно называется *гелиевым* или *свинцовым*.

В наиболее простом случае, когда возраст минерала априори относительно невелик ($t < 200$ млн лет), а Th в его составе отсутствует, возраст может быть оценен приближенно по формуле

$$t=1{,}155\frac{1}{\lambda_{U^{238}}}\frac{C_{Pb}}{C_U}, \qquad (1.48)$$

где C_{Pb}, C_U - массовые доли свинца и урана.

При наличии в минерале Th его содержание выражают в эквиваленте U, учитывая соотношения их активностей. Формула для расчета возраста при этом выглядит так:

$$t = 7600\frac{C_{Pb}}{0{,}36C_{Th} + C_U}. \qquad (1.49)$$

При более древнем возрасте минералов (t > 200 млн. лет) его рассчитывают через содержания изотопов свинца ${}_{82}Pb^{206}$, ${}_{82}Pb^{207}$ и ${}_{82}Pb^{208}$, определяемые масс-спектрометрическим методом.

Расчет ведется по формулам [59]:

$$\begin{cases} t=\dfrac{1}{\lambda_{U^{238}}}\ln\left(1+1{,}155\dfrac{C_{Pb^{206}}}{C_{U^{238}}}\right); \\ t=\dfrac{1}{\lambda_{U^{235}}}\ln\left(1+1{,}135\dfrac{C_{Pb^{207}}}{C_{U^{235}}}\right); \\ t=\dfrac{1}{\lambda_{Th^{232}}}\ln\left(1+1{,}115\dfrac{C_{Pb^{208}}}{C_{Th^{232}}}\right). \end{cases} \qquad (1.50)$$

Возраст, полученный по трем формулам (1.50), теоретически должен быть одинаковым. В действительности этого обычно не наблюдается, так как природные системы не являются полностью закрытыми, и на протяжении геологической истории возможна частичная потеря как промежуточных, так и конечных нуклидов. Определенную погрешность дают также и масс-спектрометрические измерения.

Для определения истинного возраста урановых минералов и руд применяют способ так называемой «*кривой конкордии*». Указанная кривая представляет собою теоретическую зависимость отношения ${}_{82}Pb^{207}/{}_{92}U^{235}$ к ${}_{82}Pb^{206}/{}_{92}U^{238}$ от возраста природных сред, построенного на основании закона распада (рис. 1.9) [59].

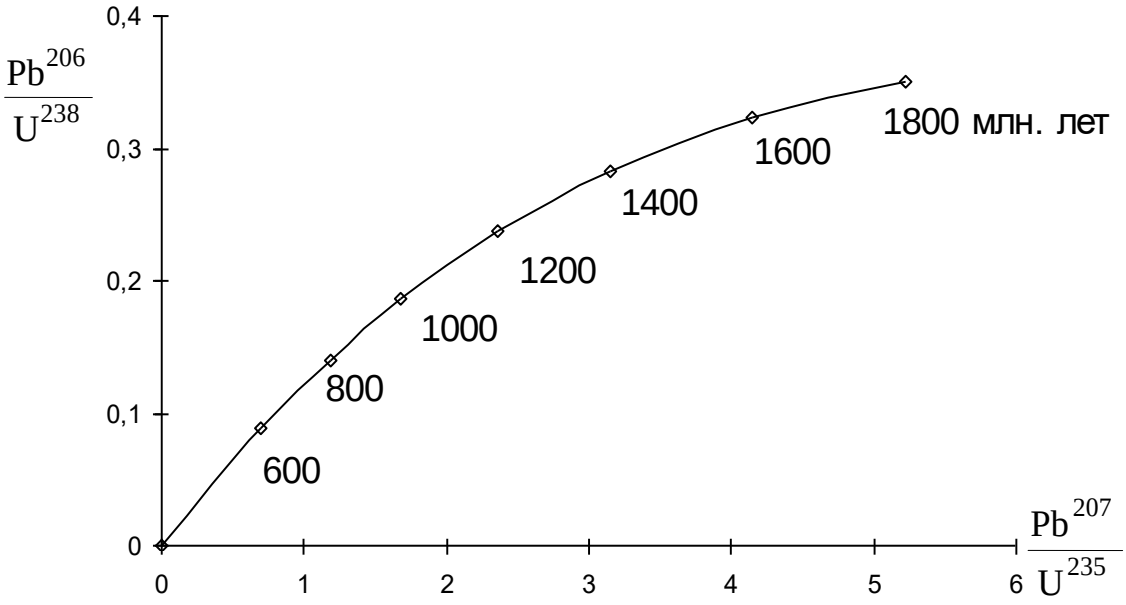


Рис. 1.9

Кроме указанных методов, для датировки природных образований используются также K-Ar-, Rb-Sr- и радиоуглеродный (C^{14}) методы.

Калий-аргоновый метод. Калий - широко распространенный элемент, входит в состав большинства горных пород. Кларк К в земной коре равен 2,5 %, его содержание в горных породах колеблется от 0,03 до 3,34 % (кроме солей). Почти 18 % массы земной коры приходится на долю К-содержащего минерала – ортоклаза (КПШ). Это двойная соль кремниевой кислоты $K_2O{\cdot}Àl_2O_3{\cdot}6SiO_2$. В результате химического выветривания ортоклаз превращается в каолин, песок (SiO_2) и воду. По этой причине К можно встретить как в изверженных, так и в осадочных горных породах.

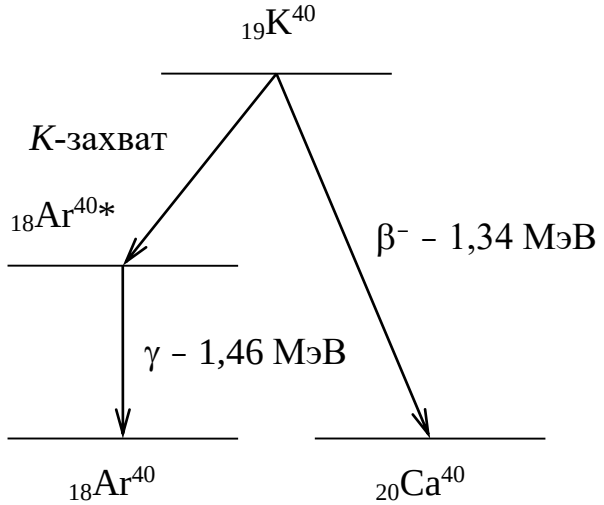


Рис. 1.10

Природная смесь К состоит из двух стабильных изотопов $_{19}К^{39}$ (98,03 %), $_{19}К^{41}$ (6,91 %) и одного радиоактивного - $_{19}К^{40}$ (0,0119 %). Радиоактивный изотоп калия распадается путем β^--превращения (с вероятностью 89 %) и превращения типа *К*-захвата (11 %), сопровождающегося γ-излучением с энергией 1,46 МэВ (рис. 1.10). В результате *К*-захвата по схеме

$$_{19}К^{40} + \beta^- \rightarrow {}_{18}Ar^{40} + \upsilon$$

образуется возбужденное ядро $_{18}Ar^{40}$*, которое переходит в основное состояние после испускания γ-кванта с энергией 1,46 МэВ.

Постоянная распада λ_e, соответствующая явлению *e*-захвата, для $_{19}K^{40}$ составляет $0{,}585\cdot10^{-10}$ год$^{-1}$. Бета-минус распад $_{19}K^{40}$ приводит к образованию стабильного изотопа $_{20}Ca^{40}$ по схеме

$$_{19}K^{40} - \beta^- \rightarrow {}_{20}Ca^{40} + \tilde{\upsilon}.$$

Постоянная β^--распада $_{19}K^{40}$ составляет $\lambda_\beta = 4{,}72\cdot10^{-10}$ год$^{-1}$.

При расчетах значение абсолютного возраста *t* может быть получено из следующего соотношения:

$$t = \frac{1}{\lambda_\beta + \lambda_e} \ln\left(1 + \frac{\lambda_\beta + \lambda_e}{\lambda_e} \frac{C_{Ar^{40}}}{C_{K^{40}}}\right). \qquad (1.51)$$

Надежность датировки пород с помощью K-Ar-метода во многом зависит от скорости утечки образующегося Ar из минералов.

Рубидиево-стронциевый метод. Рубидий – химический элемент I группы периодической системы, имеет порядковый номер $Z = 37$ и атомный вес $A = 85{,}47$. Рубидий малораспространен в природе, его кларк в земной коре составляет 0,015 % по массе.

Среди изверженных пород наиболее высокие содержания Rb отмечаются в кислых разностях (0,02 %), а наиболее низкие – в ультрабазитах (2 г/т). Среднее содержание Rb в глинах и глинистых сланцах 0,02 %. В природе Rb, как правило, встречается совместно с Cs и собственных минералов не образует. Наиболее высокие концентрации этих элементов наблюдаются в некоторых минералах пегматитовых жил: полевых шпатах, слюдах, бериллах и особенно в поллуците. Содержание Rb в ортоклазах и микроклинах может достигать 2,7-2,8 %, в мусковитах – 1,8, в биотитах – 0,37, в лепидолитах – 2,7-3,7 %.

Природный рубидий состоит из смеси двух изотопов с массовыми числами 85 (72,81 %) и 87 (27,19 %). Изотоп $_{37}Rb^{87}$ β-радиоактивен и распадается по схеме

$$_{37}Rb^{87} - \beta^- \rightarrow {}_{38}Sr^{87} + \tilde{\upsilon}$$

с периодом полураспада $T = 4{,}7\cdot10^{10}$ лет. В природных условиях встречаются четыре стабильных изотопа стронция: $_{38}Sr^{84}$ (0,56 %), $_{38}Sr^{86}$ (9,86 %), $_{38}Sr^{87}$ (7,02 %) и $_{38}Sr^{88}$ (82,56 %).

Данные по относительной распространенности стабильных изотопов *Sr* были получены после того, как Гольдшмидт в 1937 г. высказал предположение, что β^--распад $_{37}Rb^{87}$ с образованием $_{38}Sr^{87}$ можно использовать в качестве

геохронометра. Поскольку изотоп $_{38}Sr^{87}$ может быть как естественным, так и радиогенным (за счет распада $_{37}Rb^{87}$), то при расчете геологического возраста следует сопоставлять между собою массовые доли радионуклида $_{37}Rb^{87}$ и радиогенной «добавки» $_{38}Sr^{87}$.

Время *t*, необходимое для получения имеющегося в данном образце количества радиогенного $_{38}Sr^{87}$, рассчитывается из соотношения

$$t = \frac{1}{\lambda_{Rb^{87}}} \frac{C_{Sr^{87}}}{C_{Rb^{87}}}, \qquad (1.52)$$

где $\lambda_{Rb^{87}}$ – постоянная распада материнского изотопа $_{37}Rb^{87}$;

$C_{Rb^{87}}$, $C_{Sr^{87}}$ – массовые доли изотопа $_{37}Rb^{87}$ и радиогенного $_{38}Sr^{87}$.

Радиоуглеродный метод. Ниже рассматривается метод, который широко используется для датировки объектов жизнедеятельности, существовавших тысячи или первые десятки тысяч лет. Речь идет о датировке по радиоуглероду $_6C^{14}$, который образуется в атмосфере под действием космического излучения.

Космические лучи, состоящие из частиц высокой энергии, разрушают в верхних слоях атмосферы ядра атомов азота, входящих в состав воздуха. При этом образуются вторичные ядерные частицы и дочерние продукты, которые могут быть радиоактивными. Вторичные ядерные частицы, например нейтроны, могут взаимодействовать с $_7N^{14}$ и образовывать $_1H^3$ и $_6C^{14}$:

$$_7N^{14} + {}_0n^1 \rightarrow {}_6C^{12} + {}_1H^3,$$
$$_7N^{14} + {}_0n^1 \rightarrow {}_6C^{14} + {}_1H^1.$$

Первая из этих реакций идет на быстрых, а вторая на тепловых нейтронах. Возникающие под действием космических лучей нейтроны замедляются в воздухе до тепловых энергий, поэтому скорость образования ядер $_6C^{14}$ оказывается заметно выше скорости образования $_1H^3$ (примерно 2,3 атом/с на 1 см^2 поверхности для $_6C^{14}$ и 0,4 атома $_1H^3$ при тех же условиях).

Радиоуглерод $_6C^{14}$ является β^--излучателем с периодом полураспада 5570 лет. Максимальная энергия β-частиц составляет 155 кэВ. Если предположить, что интенсивность космического излучения оставалось постоянной за последние десятки тысяч лет, то, исходя из периода полураспада $_6C^{14}$, можно считать, что к настоящему времени достигнуто равновесие между образующимися и распадающимися ядрами $_6C^{14}$. Атом радиоуглерода в воздухе довольно быстро окисляется и переходит в двуокись $C\hat{I}_2$.

Растительный мир живет за счет атмосферного углекислого газа. Животный мир питается растительным, и, следовательно, слабо радиоактивный углерод проникает в организм животных. В результате распада атомов $_6C^{14}$

каждый грамм углерода в живом организме испускает примерно 15 β-частиц в минуту. Когда жизнедеятельность прекращается, то обрывается и углеродный обмен с атмосферой и биосферой, количество атомов ${}_6C^{14}$ в организме не восполняется, происходит лишь их распад с известным периодом. Спустя 5570 лет после прекращения жизнедеятельности, число испускаемых β-частиц на каждый грамм содержащегося в нем С уменьшается вдвое, а спустя два периода полураспада ${}_6C^{14}$, это число уменьшится в 4 раза. Следовательно, измеряя удельную активность ${}_6C^{14}$, можно установить в пределах точности метода, когда для изучаемого объекта прекратился углеродный обмен, т. е. когда этот живой организм умер.

Зная удельную радиоактивность атмосферного углерода I_0 (та же, что и в организме) и активность исследуемого ископаемого остатка I, можно вычислить возраст с момента прекращения обмена углеродом:

$$t = \frac{1}{\lambda_{C^{14}}} \ln\left(\frac{I_0}{I}\right). \qquad (1.53)$$

Радиоуглеродный метод применим для датировки образований, возраст которых не превышает 20 тыс. лет. Для него пригодны древесный уголь (обугленное вещество), древесина, торф, кости, раковины и т. п.

Радиоуглеродный метод был проверен на образцах пород, возраст которых был хорошо известен из археологических данных. Одним образцом служил брусок кипариса из гробницы фараона Снофру; возраст бруска по археологическим данным оценивался в 5600 лет. Другой образец был взят из палубы похоронного судна фараона Сезостриса III; возраст – 3800 лет. Для каждого из этих образцов, как и для ряда других, возраст по ${}_6C^{14}$ совпал с археологическими данными с точностью ±10 % относительных [61].

1.5.3. Физико-химические свойства некоторых естественно-радиоактивных элементов

Уран (U). Уран является наиболее тяжелым природным элементом с порядковым номером 92. Атомный вес природной смеси его изотопов (U^{238}, U^{235}, U^{234}) равен 238,03, плотность урана – 18,9 г/см^3. Этот элемент открыт Клапротом в 1782 г., а его радиоактивность обнаружена Беккерелем в 1896 году. Уран характеризуется большим зарядом ядра и сложным строением электронной оболочки. В природных условиях он встречается в 4- (U^{+4}) и 6-валентной (U^{+6}) формах. Основной особенностью U является большая химическая активность и сильная восстановительная способность, особенно ярко проявляющаяся в кислых водных растворах. С кислородом U образует

оксиды UO_2, U_3O_8, и UO_3. Последний оксид в природных условиях без воды обычно не встречается. Галогенные соединения урана неустойчивы и весьма летучи. Сульфатные соединения урана в природе неизвестны. В природных условиях соединения 4-валентного U имеют черный, темно-коричневый и красно-бурый цвет и характеризуют гипогенные условия образования минералов при условиях восстановительной среды. Соединения U^{+6} имеют яркий зеленовато-желтый цвет и относятся ко вторичным урановым минералам.

Все урановые минералы делятся на *первичные* и *вторичные*. В группу первичных минералов U, представленных его оксидами, в первую очередь выделяют уранинит и настуран, отличающийся от уранинита тем, что он образуется в виде плотных натечных форм. Для всех первичных минералов U характерно присутствие Th. Вторичные минералы U представлены карбонатами, силикатами, фосфатами, ванадатами и сульфатами уранила. Во вторичных урановых минералах Th, как правило, отсутствует.

Кларк U в земной коре составляет $2{,}5 \cdot 10^{-4}$ %. Наиболее высокие средние содержания урана отмечаются в кислых изверженных породах (4,5 г/т), а наиболее низкие – в ультрабазитах $3 \cdot 10^{-7}$ %. В глинах и глинистых сланцах среднее содержание урана 3,2 г/т. Основная масса U (60 - 90 %) находится в литосфере в рассеянном состоянии, хотя известно большое количество (~200) U-содержащих минералов. Наибольшее практическое значение из них имеет около 30. Многие U-содержащие минералы являются сырьем на редкие земли и другие элементы.

Природные скопления урана образуются при магматических и гидротермальных процессах, при осадконакоплении, метаморфизме и выветривании пород. Встречаются как собственно урановые месторождения, так и комплексные. Массовые доли U в рудах колеблются от сотых долей процента до первых процентов. Среди урановых руд выделяют богатые (1-3 %), рядовые (0,1-1,0 %) и бедные (0,05-0,1 %). Из комплексных руд U извлекается и при убогих концентрациях (< 0,05 %)

Изотоп U^{235} делится под действием тепловых нейтронов и является основным сырьем для тепловых АЭС. Наиболее распространенный изотоп U^{238} делится под действием быстрых нейтронов и служит сырьем для получения стратегического делящегося материала – плутония. Образование Pu идет по следующей схеме:

$$_{92}U^{238} + {}_{0}n^{1} \rightarrow {}_{92}U^{239}\ (\beta^-,\ 25\ \text{мин}) \rightarrow {}_{93}Np^{239}\ (\beta^-,\ 2{,}33\ \text{сут}) \rightarrow {}_{94}Pu^{239}.$$

Изотоп $_{94}Pu^{239}$ был открыт в 1941 г; он является α-излучателем с периодом полураспада $2{,}44 \cdot 10^4$ лет, превращаясь в дочерний продукт $_{92}U^{235}$.

Изотоп $_{94}Pu^{239}$ имеет очень большое сечение деления тепловыми нейтронами (738 барн) и испускает при одном акте деления ~2,9 нейтрона, что позволяет использовать $_{94}Pu^{239}$ в качестве стратегического сырья.

До пуска первых атомных реакторов урановые руды добывали в основном для извлечения из них Ra. Мизерные количества урановых соединений использовали в некоторых красителях и катализаторах. Когда из элемента, не имеющего почти никакого промышленного значения, U превратился в стратегическое сырье № 1, началась настоящая охота за его рудами. Чуть ли не все уголки земного шара были обследованы на U, благо его радиоактивность подсказывала принципы конструирования чувствительных поисковых радиометров.

При среднем содержании урана 2,5 г/т в некоторых горных породах, например в гранитах, его массовая доля составляет 4,5 г/т. Полная энергия, «спрятанная» в этих граммах, эквивалентна теплосодержанию сотен тонн каменного угля. Поэтому (а еще и потому, что во всем мире наблюдается устойчивая тенденция к извлечению U, и не только его, из все более бедных руд) можно полагать, что со временем гранит вполне может оказаться одним из видов минерального сырья. Всего в относительно тонком, 20-км верхнем слое Земли заключено 10^{14} т U. Количество громадное, способное удовлетворить все энергетические потребности человечества на долгое время. Энергия этого U оценивается астрономической цифрой – $2{,}3 \cdot 10^{24}$ киловатт-часов. Это в 10^6 раз больше, чем могут дать все разведанные и предполагаемые месторождения горючих полезных ископаемых.

Если бы в массе планеты концентрация U была такой же, как в гранитном слое, то температура Земли была бы намного выше существующей. Это обстоятельство, подтвержденное прямыми измерениями, показывает, что по мере продвижения к центру Земли концентрация U падает.

Способов извлечения U из руд разработано великое множество. Причина тому, с одной стороны – стратегическая важность этого элемента, а с другой, – разнообразие его минеральных форм. Но каков бы ни был метод или сырье, любое урановое производство включает три стадии: предварительное концентрирование (обогащение), выщелачивание U и получение достаточно чистых соединений U осаждением, экстракцией или ионным обменом. Далее, в зависимости от назначения получаемого урана, следует обогащение продукта изотопом U^{235} или сразу же восстановление элементного (металлического) урана.

Радий (Ra). Промежуточный продукт распада в радиоактивном семействе U^{238}, радий имеет порядковый номер 88 и атомный вес 226, плотность 5,0 г/см^3. Открыт супругами Кюри в 1898 г. В чистом виде представляет собой довольно мягкий металл серебристого цвета. Химические свойства Ra близки к свойствам Ba, вместе с которым они часто встречаются в руде. Радий всегда двухвалентен. При взаимодействии с кислотами оксиды и гидраты окисей Ra легко образуют соли, причем соли с анионами Cl^- и NO_3^- легкорастворимы, а соли с анионами F^-, SO_4^-, CO_3^- – труднорастворимы в воде.

В природных условиях Ra встречается преимущественно в рассеянном состоянии и вследствие чрезвычайно низкого кларка ($1\cdot10^{-10}$ %) самостоятельных минералов не образует. Наиболее высокие содержания Ra отмечаются в кислых породах, а наиболее низкие – в ультрабазитах. Среднее содержание Ra в глинах и глинистых сланцах $1\cdot10^{-10}$ %.

Наиболее распространенный изотоп $_{88}Ra^{226}$ образуется за счет α-распада иония Io ($_{90}Th^{230}$). Изотоп $_{88}Ra^{226}$ является α-излучателем с периодом полураспада 1602 лет. Кроме этого изотопа, в природе еще известен продукт цепочки ядерных превращений семейства U^{235} - Ra^{223} (T = 11,43 сут) и продукт цепочки Th^{232} - Ra^{224} (T = 3,64 сут).

Радон (Rn). Радиоактивный инертный газ (эманация), существует в природе как одно из промежуточных звеньев в цепочке ядерных превращений семейства U^{238}. Образуется в результате α-распада Ra^{226}. Массовое число 222, атомный номер 86, период полураспада 3,825 сут. Является α-излучателем. К настоящему времени известно 19 изотопов Rn с массовыми числами 204 и от 206 до 224. Искусственным путем получено 16 изотопов. В природных средах существует всего три изотопа Rn.

Эманация тория – Tn ($_{86}Rn^{220}$ – торон) является членом другого естественно-радиоактивного семейства – ряда $_{90}Th^{232}$. Это изотоп радона с массовым числом 220 и периодом полураспада 55,6 с.

Третий природный изотоп радона – актинон An ($_{86}Rn^{219}$). Так же как радон и торон, он является радиоактивным газом, относящихся к группе инертных (благородных) газов. Актинон является членом семейства актиноурана $_{92}U^{235}$, его массовое число 219, период полураспада 3,96 с.

Рассматриваемые эманации распространены в почвенном и (очень незначительно) в атмосферном воздухе, а также в минеральных источниках. Концентрация Rn в почвенном воздухе изменяется в широких пределах: от $2{,}6\cdot10^{-15}$ до $44\cdot10^{-15}$ %. В районах развитого уранового оруденения концентрация Rn в почвенном воздухе может достигать 10^{-12} %. В атмосферном воздухе

концентрация Rn невелика, примерно на три порядка ниже нормальной концентрации в почвенном воздухе, и составляет ~$4 \cdot 10^{-18}$ %.

В природных водах концентрация Rn меняется в очень широких пределах – от $4 \cdot 10^{-16}$ до $4 \cdot 10^{-10}$ %.

Торий (Th). Естественно-радиоактивный элемент Th состоит из одного изотопа с массовым числом 232, который является родоначальником ториевого семейства. Открыт Берцелиусом в 1828 г., а его радиоактивность обнаружена М. Кюри в 1898 г.

Торий – металл белого цвета, плотностью 11,7 г/см^3, темнеющий на открытом воздухе. Торий является относительно широко распространенным элементом, его присутствие можно обнаружить практически в любой горной породе. Кларк Th составляет $1{,}5 \cdot 10^{-3}$ % (15 г/т), т. е. примерно в четыре раза выше кларка урана. Наиболее высокое содержание тория отмечается в кислых породах (18 г/т), минимальные – в ультрабазитах (до $5 \cdot 10^{-7}$ %). В некоторых типах изверженных пород содержание Th достигает сотых долей процента, в глинах и глинистых сланцах – 11 г/т.

Известно более 120 Th-содержащих минералов, однако промышленное значение имеют немногие: монацит (GeLaTh)[PO_4], торит $ThSiO_4$, ураноторит, торианит и др. Торий тесно связан с редкими землями и U. Основным источником Th является монацитовый песок. Не меньшую ценность представляет и находящийся в его составе Ce. Торий может использоваться для получения делящегося материала, которым наряду с U^{235}, Pu^{239} является U^{233}. Этот изотоп получается по ядерной реакции

$$_{90}Th^{232}\ (n,\gamma)\ _{90}Th^{233}\ (\beta^-) \rightarrow\ _{91}Pa^{233}\ (\beta^-) \rightarrow\ _{92}U^{233}.$$

Калий (К). Среди трех природных изотопов калия только $_{19}К^{40}$ является радиоактивным с содержанием в естественной смеси 0,0119 % и периодом полураспада $T = 1{,}27 \cdot 10^9$ лет. Физико-химические свойства К резко отличаются от свойств других радиоактивных элементов. Прежде всего К распространен в природе в несравненно больших количествах. Кларк К в земной коре равен 2,4 %, высокие содержания отмечены в щелочных и кислых породах – 4,9 и 3,6 % соответственно, минимальные – в ультрабазитах – 0,03 %. Калий относится к группе щелочных металлов, имеет порядковый номер 19, атомную массу 39,1 и плотность 0,86 г/см^3.

Из наиболее распространенных К-содержащих минералов, обуславливающих повышенную радиоактивность горных пород, можно назвать сильвин ÊCl, карналлит, микроклин и ортоклаз. В глинистых минералах

значительная часть Ê находится в сорбированной форме и прочно связана с ними. Наиболее сильно Ê адсорбируется гидрослюдами.

1.5.4. Естественно-радиоактивные элементы в природе

Естественная радиоактивность горных пород обуславливается присутствием в их составе K, U и Th. Присутствие радиоактивных элементов в том или ином количестве характерно для всех горных пород – изверженных, метаморфических и осадочных, а также для современных почв и донных осадков различных водоемов.

Радиоактивность изверженных пород. В результате изучения радиоактивности изверженных пород были установлены закономерности.

Массовые доли U и Th, а соответственно и продуктов их распада, значительно выше в кислых породах, чем в основных; радиоактивность изверженных пород растет в направлении от ультрабазитов к кислым.

Радиоактивные элементы в магматических породах концентрируются в основном в цветных и акцессорных минералах: монаците, цирконе, сфене, рутиле, биотите и др. В наиболее общем случае в минералах пород гранитного ряда радиоактивность, связанная с U и Th, растет в направлении кварц $\rightarrow$ полевые шпаты $\rightarrow$ слюды $\rightarrow$ магнезиально-железистые минералы $\rightarrow$ акцессорные минералы. Особенности концентрации радиоактивных элементов обуславливают неодинаковую радиоактивность пород даже одного и того же интрузивного массива; для гранитов она обычно выше в зонах концентрации акцессорных минералов, в сравнении с участками, сложенными кварцем и полевыми шпатами альбитового ряда.

Радиоактивность метаморфических пород. Зависит, во-первых, от радиоактивности исходных пород, а во-вторых, от характера метаморфизма: происходил ли он с привносом материала, включая радиоактивные элементы, или этого привноса не было. Кроме того, при метаморфизме осадочных толщ может происходить минеральная перегруппировка внутри образований с обеднением или обогащением их ЕРЭ в отдельных участках толщи. Считается, что в результате перегруппировки U внутри пород, подвергшихся изменению, могут образовываться так называемого метаморфогенные месторождения урана. Из сказанного можно сделать выводы:

Радиоактивность метаморфических пород весьма различна не только для разных пород, но и для одной и той же толщи.

Радиоактивность гнейсов и сланцев, образовавшихся из глинистых отложений, в целом оказывается выше, чем радиоактивность мраморов и кварцитов, образовавшихся из осадков с пониженной радиоактивностью.

Радиоактивность пород растет при гидротермальном метаморфизме.

Радиоактивность осадочных пород. Среди осадочных пород наибольшей радиоактивностью отличаются калийные соли, глины и, особенно, горючие сланцы. Наименьшей радиоактивностью обладают известняки, доломиты, гипс, ангидрит, галит. Радиоактивность песчаников увеличивается с ростом содержания глинистого материала, слюд и акцессорных минералов. Резко аномальные содержания радиоактивных элементов нередко фиксируются в природных средах с развитием органических остатков.

В некоторых разностях углей, фосфоритов, песчаников и известняков содержание ЕРЭ может достигать промышленных значений. Нередко в осадочных породах повышенные концентрации U обусловлены гипергенными процессами выщелачивания и его переотложением в более благоприятных участках осадочных толщ. Замечено, что морские отложения содержат более высокие концентрации ЕРЭ, чем осадочные породы речного и озерного происхождения. Накопление ЕРЭ элементов в осадочных породах связано также с адсорбцией их тонкокластическим (глинистым) материалом из водоемов, где шло осадконакопление. Более подробные сведения о радиоактивности природных сред приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Содержания ЕРЭ и интенсивность γ-излучения природных сред

Породы, объекты	Содержание элементов				γ-поле	Парциальные доли ЕРЭ в $I\gamma$ (%)			Отношения ЕРЭ		
	Ra, мкг/т	U, г/т	Th, г/т	K, %	$I\gamma$, мкР/ч	Uγ	Thγ	Kγ	Th/U	U/K	Th/K
Земная кора (ЗК)	0,8 0,6-1,3	2,3 1,8-4,4	8,0 5-13	2,4 2,3-2,6	8,4 5-8	26 22-32	46 40-48	28 24-34	3,5 2,5-4,5	1,0 0,8-1,5	3,5 2,0-5
Гранитный слой ЗК	1,2 0,8-1,7	3,6 2,4-5,0	15,5 12-18	3,6 2,5-3,6	12,5 10-15	24 23-31	52 48-54	24 19-26	4,0 3,0-5	1,0 0,8-2,0	4,0 3,5-6
Базальтовый слой ЗК	0,3 0,2-0,5	1,0 0,6-1,5	3,3 1,8-3,8	1,0 0,7-1,2	3,5 2,0-5,0	28 22-32	44 40-48	28 24-34	3,5 3,0-4	1,0 0,8-1,5	3,5 2,0-4
Щелочные породы	1,6 0,1-30	4,7 0,3-89	18,5 5-80	4,9 3-12,5	18,0 9-130	25 20-35	49 40-55	26 23-32	4,0 1,0-8	1,0 0,9-3,0	4,0 1,5-9
Кислые породы	1,2 0,2-17	3,5 0,6-35	15,5 3-96	3,6 1,6-9,0	15,0 8-95	24 20-35	52 45-55	24 20-30	4,0 1,5-15	1,0 0,8-2,0	4,5 3-8
Средние породы	0,7 0,1-1,9	2,0 0,3-5,6	8,3 2-34	2,2 0,8-6,8	8,0 2-23	24 20-30	49 45-55	27 22-30	4,0 1,5-7	1,0 0,8-1,5	4,0 2-6
Основные породы	0,3 0-0,9	0,9 0,1-2,7	3,5 0,5-15	1,0 0,3-1,8	3,5 0,5-10	25 20-30	47 40-50	28 24-34	4,0 1,5-6	1,0 0,8-15	3,5 2,5-5
Ультра-базиты	0,01 0-0,02	0,03 0-0,06	0,1 0-0,3	0,03 0-0,2	0,1 0-2,0	27 22-32	46 40-48	27 24-34	3,5 1,0-4	1,0 0,8-1,5	3,0 2-4

Известняки	0,4 0,3-4,5	1,2 0,9-12	2,5 0,7-8	0,4 0,1-1,2	2,5 1,5-13	43 35-50	43 35-50	14 10-20	2,0 0,5-5	3,0 1,5-4	6,0 4-8
Сланцы	1,0 0,1-5,0	2,9 0,3-90	10,0 8-17	2,7 0,7-3,2	10,0 5-25	27 22-40	47 40-50	26 20-35	3,5 1,0-5	1,0 0,8-1,5	3,5 2-7
Глины	1,3 0,2-26	3,5 0,8-78	7,0 5-16	2,3 0,6-2,9	9,0 4-25	38 33-60	36 30-40	26 8-30	2,0 0,5-4	2,0 1,0-8	3,0 2-5
Песчаники	0,7 0,1-2,7	2,1 0,3-8	9,0 6-30	2,1 1,1-3,0	7,5 4,5-18	24 20-30	52 45-60	24 20-30	4,5 1,5-7	1,0 0,8-1,5	4,0 2-10
Почвы	0,8 0,2-2,5	2,1 0,3-4,5	6,0 2,5-15	1,4 0,3-3,6	6,0 1,8-15	32 25-55	46 30-50	22 10-25	3,0 1,0-4,5	1,5 1,0-6	4,0 2-6
Морские илы	2,0 0,3-15	3,2 1,0-20	4,6 1,6-8,8	1,2 0,5-2,5	6,5 3-30	48 40-65	34 25-35	18 10-25	1,5 0-3	2,7 1,5-10	4,0 3-5
Морская вода	10^{-4}	0,003	0,001	0,04	0	7	2	91	0,3	0,07	0,02

Примечания: 1. В числителе приведено среднее значение, в знаменателе - возможные отклонения; 2. Модули U/K и Th/K указаны в (г/т)/%.

Основная часть U и Th присутствует в горных породах, растениях и живых организмах в рассеянном состоянии. В благоприятных условиях эти элементы создают рудные скопления с коэффициентом концентрации от двух до четырех порядков (10^2-10^4). В первичных и вторичных ореолах урановых месторождений этот коэффициент снижается до 5-50 единиц.

Высокая геохимическая активность U является причиной большого разнообразия его природных образований, встречающихся в форме 4-валентных U^{4+} и неустойчивых 6-валентных U^{6+} соединений. Эти особенности обеспечивают возможность промышленных скоплений U в самых разнообразных геологических условиях. Месторождения U имеют разное происхождение и встречаются в кристаллическом основании фундамента, осадочном чехле древних и молодых платформ, и особенно широко – в областях послеплатформенного орогенеза. Они отличаются по вещественному и минеральному составам руд и не обнаруживают выраженной тенденции к устойчивой ассоциации с определенными типами месторождений других типов полезных ископаемых.

Все известные наиболее значительные концентрации U связаны с эндогенными и экзогенными процессами, протекающими в орогенных условиях формирования или распада коры континентального типа. В областях с корой океанического типа крупные месторождения U не обнаружены.

В 1986 г. академиком Н. П. Лаверовым была предложена генетическая систематика месторождений U, учитывающая новые данные и сохраняющая

привычные для специалистов основные подразделения. Среди них выделены четыре основные серии: эндогенная, экзогенная, метаморфогенная и полигенная. При этом схема систематики эндогенных месторождений насчитывает три типа: А – эндогенные месторождения, связанные с щелочно-ультраосновным метаморфизмом, Б – связанные со щелочным магматизмом и В – связанные с гранитоидным метаморфизмом.

Месторождения экзогенной серии разделяются на две группы: седиметационного-диагенетические и инфильтрационные (эпигенетические), образованные поверхностными и подземными водами. В первую группу входят осадочные месторождения, образованные в речных, озерно-болотных и морских условиях. Вторая группа подразделяется на три класса месторождений, образованных грунтовыми, пластовыми и трещинными подземными водами. Внутри выделяются типы экзогенных месторождений, отличающихся минеральным и вещественным составом руд, условиями их формирования и морфологией рудных тел.

Месторождения метаморфогенной серии подразделяются на две группы – метаморфизованные и ультраметаморфизованные. Группы включают несколько классов, которые в свою очередь состоят из конкретных типов месторождений.

Месторождения полигенной серии в качестве самостоятельных выделяются Лаверовым впервые. Они включают 2 группы, 3 класса и 6 типов месторождений, например полиметаллические урановые (Ni, Co, Cu, Ag).

1.6. Метрология радиационных измерений

1.6.1. Измеряемые величины и единицы измерений [48]

Физические величины, прямо или косвенно определяемые при радиационных измерениях, приведены в табл. 1.4. Это – масса и массовая доля радиоактивных веществ, активность, плотность потока ионизирующих излучений и дозовые характеристики γ-поля. Для удобства работы с литературой наряду с единицами системы СИ в табл. 1.4. приведены ранее применявшиеся единицы и их соотношения с единицами СИ.

В соответствии со стандартом СЭВ 1052-78 массу радиоактивных веществ выражают в килограммах и производных от них единицах (миллиграммах, граммах, тоннах и т. п.).

Содержание радиоактивных веществ (ГОСТ 8.505, прил. 4) – обобщающее наименование физических величин: массовой и объемной доли, массовой концентрации, которые количественно характеризуют состав горных

пород и руд. Единицами их измерений являются массовые и объемные проценты, кг/кг, кг/м^3 и др.

Единицей *активности*, характеризующей число ядерных превращений в источнике в секунду, является *беккерель* (Бк). Один беккерель соответствует активности источника, в котором происходит одно ядерное превращение в секунду. Переход от активности a (Бк) радионуклида с постоянной распада λ (с$^{-1}$) к массе M (г) осуществляется по формуле

$$a = \lambda \frac{N_A}{A} M , \qquad (1.54)$$

где N_A – число Авогадро; A – массовое число радионуклида.

Таблица 1.4

Единицы измерения радиоактивных веществ и ядерных излучений

Физическая величина	Единицы измерения		Соотношение единиц
	система СИ	внесистемные ед.	
Масса	кг	мг-экв Ra	1 мг-экв Ra = 10^{-6} кг Ra (по γ-излучению)
Активность	беккерель (Бк)	кюри (Ки)	1 Ки = $3{,}7\cdot10^{10}$ Бк 1 Бк = $2{,}7\cdot10^{-10}$ Ки
Массовая доля	кг/кг, % мас.	г/г, % мас.	1 % мас. = 0,01 кг/кг 1 кг/кг = 100 % мас.
Объемная доля	м^3/м^3, % об.	См^3/см^3, % об.	1 % об. = 0,01 м^3/м^3 1 м^3/м^3 = 100 % об.
Удельная активность	Бк/кг	Ки/г, Ки/кг	1 Ки/г = $3{,}7\cdot10^{13}$ Бк/кг 1 Бк/кг = $2{,}7\cdot10^{-14}$ Ки/г
Объемная активность	Бк/м^3	Ки/л, эман	1 Ки/л = $3{,}7\cdot10^{13}$ Бк/м^3 1 эман = 10^{-10} Ки/л 1 Бк/л = 0,27 эман
Плотность потока ядерных частиц	с$^{-1}\cdot$м$^{-2}$	с$^{-1}\cdot$см$^{-2}$	1 с$^{-1}\cdot$см$^{-2}$ = 10^4 с$^{-1}\cdot$м$^{-2}$ 1 с$^{-1}\cdot$м$^{-2}$ = 10^{-4} с$^{-1}\cdot$см$^{-2}$
Энергия	джоуль (Дж)	эВ	1 эВ = $1{,}602\cdot10^{-19}$ Дж 1 Дж = $6{,}24\cdot10^{18}$ эВ
Плотность потока энергии	Вт/м^2	эВ/(см$^2\cdot$с)	1 эВ/(см$^2\cdot$с) = $1{,}602\cdot10^{-15}$ Вт/м^2 1 Вт/м^2 = $6{,}24\cdot10^{14}$ эВ/(см$^2\cdot$с)
Экспозиционная доза излучения	Кл/кг	рентген (Р)	1 Р = $2{,}58\cdot10^{-4}$ Кл/кг 1 Кл/кг = $3{,}88\cdot10^3$ Р
Мощность экспозиционной дозы излучения	А/кг	Р/с, мкР/ч	1 Р/с = $2{,}58\cdot10^{-4}$ А/кг 1 мкР/ч = 0,0717 пА/кг

			1 пА/кг ≅ 14 мкР/ч
Поглощенная доза излучения	грей (Гр)	рад	1 рад = 0,01 Гр 1 Гр = 100 рад
Мощность поглощенной дозы излучения	Гр/с	рад/с	1 рад/с = 0,01 Гр/с 1 Гр/с = 100 рад/с
Эквивалентная поглощенная доза излучения	зиверт (Зв)	бэр	1 бэр = 0,01 Зв 1 Зв = 100 бэр

Ранее активность выражали в *кюри* (Ки), понимая под этим число ядерных превращений в секунду в 1 г Ra без его продуктов распада. В соответствии с (1,54) при M_{Ra} = 1 г активность Ra составит $3{,}7\cdot10^{10}$ Бк.

Различают *массовую* (или удельную) и *объемную* активность. В первом случае это активность вещества единичной массы (Бк/кг), во втором - вещества единичного объема (Бк/м^3). Обычно в радиометрии объемная активность выражается в Бк/л при оценке концентраций эманаций. Ранее применяли единицу измерения удельной активности – кюри на литр (Ки/л) и производную от нее – *эман*: 1 эман = 10^{-10} Ки/л.

Плотность потока частиц и квантов имеет размерность с$^{-1}$·м$^{-2}$, плотность потока энергии – Вт/м^2. Из-за сложности измерения потока энергии для количественной характеристики рентгеновского и γ-излучения на практике используют дозовые параметры. Под *дозой* понимается энергия излучения, предназначенная для передачи или переданная среде и рассчитанная на единицу массы или объема этой среды. Доза, определяемая по степени ионизации воздуха в условиях электронного равновесия, называется *экспозиционной* дозой *D*; доза, определяемая поглощенной энергией в любом другом веществе, – поглощенная доза *X*. Доза, отнесенная к единице времени, – *мощность* дозы.

Единица экспозиционной дозы – кулон на килограмм (Кл/кг). Это экспозиционная доза рентгеновского или γ-излучения, при которой сопряженная корпускулярная эмиссия в одном килограмме сухого атмосферного воздуха за время *t* образует ионы, несущие заряд каждого знака, соответствующий 1 Кл. Единица *мощности экспозиционной дозы (МЭД)* – кулон на килограмм в секунду [Кл /(кг·с)] или ампер на килограмм (А /кг).

Мощность экспозиционной дозы I_D (А /кг) от полиэнергетического источника с квантовым выходом K_i и плотностью потока *i*-й линии спектра n_i (с$^{-1}$·м$^{-2}$)

$$I_D = \frac{D}{t} = \sum_{i=1}^{K} \frac{E_i n_i}{F}, \qquad (1.55)$$

где E_i - энергия i-й линии в спектре γ-излучения (эВ);

F - энергетический эквивалент (Кл /кг), равный $2{,}75 \cdot 10^{14}$ эВ.

1.6.2. Эталоны и образцовые меры [48]

В радиометрической разведке используют стандартные образцы состава ЕРЭ и их активности, а также образцовые источники плотности потока заряженных частиц и мощности дозы γ-излучения.

Стандартные образцы состава, аттестованные по массовой доле K, U и Th, изготовляют в виде порошковых препаратов для целей радиометрического анализа, а также в виде насыщенных и ненасыщенных по γ-лучам рудных моделей, используемых для градуирования γ-спектрометров.

Стандартные образцы активности Rn представляют собою водные растворы $RaCl_2$, аттестованные по массе Ra с погрешностью 1-3 % отн. Обычно это жидкие радиевые эталоны типа ЕВ-8, ЕВ-9, ЕВ-10 с массой Ra, соответственно $(100,10,1) \times 10^{-10}$ г, а также другие источники этого типа с массой Ra до $5 \cdot 10^{-6}$ г (ЕВ-65). В герметичном сосуде (после предварительного продувания), содержащем водный раствор Ra с массой M_{Ra} (г), за время t образуется Rn активностью в Бк:

$$a_{\mathrm{Rn}} = 3{,}7 \cdot 10^{10} M_{\mathrm{Ra}} \left[1 - \exp\left(-\lambda_{\mathrm{Rn}} t\right)\right], \qquad (1.56)$$

или в кюри (Ки):

$$a_{\mathrm{Rn}} = M_{\mathrm{Ra}} \left[1 - \exp\left(-\lambda_{\mathrm{Rn}} t\right)\right]. \qquad (1.57)$$

В качестве образцовых источников плотности потока α-частиц используют радиоизотопы Pu^{239}, Pu^{234}, U^{238}; β-частиц – Sr^{90} в равновесии с Y^{90}; нейтронного излучения – Pu+Be, Cf^{252} и др.

Стандартные образцы мощности дозы γ-излучения изготовляют из смеси солей $RaS\hat{I}_4$ и $BaS\hat{I}_4$ в виде ампульных источников в Pt-Ir-экране толщиной 0,5 мм или в другом кожухе, с толщиной стенок, эквивалентной по поглощающим свойствам 0,5 мм Pt. Обычно это источники типа ЕР, аттестованные по массе Ra (мг) с погрешностью 0,5-2,0 % отн. Из них наиболее удобны для использования источники $P_{1\text{-}2}$, C_{41} с массой Ra соответственно 1,0 и 0,1 мг, также ЕР-1 и ЕР-14.

Расчетная мощность дозы (пА/кг) γ-излучения источника массой M_{Ra} (мг) на расстоянии R (м) описывается соотношением

$$I_D(R) = 60{,}2\frac{M_{\text{Ra}}}{R^2}. \qquad (1.58)$$

Мощность дозы в микрорентгенах в час (мкР/ч):

$$I_D(R) = 840\frac{M_{\text{Ra}}}{R^2}. \qquad (1.59)$$

Сопоставляя между собою (1.58) и (1.59), видно, что 1 пА/кг ≅14 мкР/ч.

1.6.3. Средства измерения и их метрология

В качестве средств измерения в радиометрической разведке используют радиометры, эманометры, γ-спектрометры разного назначения (табл. 1.5). Измерения этими приборами физических величин относятся к разделу косвенных. Для перехода к их действительным значениям выполняют градуирование аппаратуры с помощью эталонов и образцовых мер.

При измерениях часто говорят о *пороге чувствительности*, под которым принято понимать наименьшее значение измеряемой величины, которое может быть обнаружено прибором в превышении над флуктуацией фонового излучения с заданной доверительной вероятностью.

Значение порога чувствительности L оценивают по формуле

$$L = k\sigma_{\text{ф}}, \qquad (1.60)$$

где $\sigma_{\text{ф}}$ - среднеквадратическое отклонение измеряемых значений фона;

k - коэффициент, соответствующий значению доверительной вероятности (обычно $k = 3$).

1.6.4. Погрешности измерений

Разность Δ между результатом измерения x и истинным значением x_0 измеряемой величины называется *погрешностью измерений*:

$\Delta = x - x_0$.

По своей структуре погрешности измерений подразделяются на систематические, случайные, грубые, аппаратурные, методические, абсолютные и относительные.

Систематическая погрешность представляет собою составляющую погрешности Δ, остающуюся постоянной или закономерно изменяющуюся при повторных измерениях одной и той же величины.

Случайная погрешность – это составляющая погрешности Δ, изменяющаяся случайным образом при повторных измерениях.

Грубая погрешность – отклонение измеряемой величины от истинной вследствие грубого нарушения методики измерений оператором или следствие неисправности аппаратуры.

Таблица 1.5

Радиометрическая аппаратура и ее характеристики

Прибор	Область применения	М, кг	Питание	Детектор	Регистратор	Порог чувст-вительности	Верхний предел регистрации
СРП-68-01, радиометр	Пешеходная γ-съемка	3,6	А-343 (9 шт.)	NaI(Tl) 30×25 ФЭУ-85	Стрелочный, телефон	0,07 при фоне 0,35 пА/кг	215 пА/кг
СРП-88Н, радиометр	Пешеходная γ-съемка	2,2	А-343 (4 шт.)	NaI(Tl) 25×40 ФЭУ-85	Цифровой индикатор	0,1 пА/кг	600 пА/кг
СРП-88Н1, радиометр	Шпуровая γ-съемка	4,1	А-343 (4 шт.)	NaI(Tl) 10×40 ФЭУ-60	Цифровой индикатор	0,2 пА/кг	600 пА/кг
СП-4, переносной γ-спектрометр	Пешеходная γ-съемка	6,8	Рубин (5 шт.)	NaI(Tl) 80×80 ФЭУ-110	Стрелочный, цифровой	U, Th – 1 г/т; K – 0,2 %	U, Th – 0,03 %; K – 25 %
РКП-305, «Карат», концентрометр	Пешеходная и шпуровая γ-съемка	9,2	А-343 (9 шт.)	NaI(Tl) 80×80 ФЭУ-110	Цифровая индикация U, Th, K	U, Th – 0,4 г/т; K – 0,1 %	U, Th – 0,05 %; K – 50 %
СКАТ-77, комплексная аэрогеофизическая станция	γ-спектрометр, магнитная, электрическая аэросъемка	430	Бортовая сеть 27 В	NaI(Tl) 200×100 (2-12 шт.) ФЭУ-110	Аналоговый, цифровой магнитный (РУМС-2000)	U – 0,2 г/т; Th – 0,5 г/т; K – 0,05 %	U – 0,025 %; Th – 0,1 %; K – 32 %
РСС-006, скважинный γ-спектрометр	γ-спектрометр. каротаж	20	11-16 В; 5 Вт	CsI(Tl) 25×80 ФЭУ-67Б	Цифро-аналоговый	U, Th – 5 г/т; K – 1 %	U, Th – 3 %; K – 50 %
«Гамма-01С», лабораторный γ-спектрометрический комплекс	Измерения и обработка спектров γ-излучения	20, 320 Pb	Сеть ~220 В	NaI(Tl) 75×40, энергетич. разрешение – 8 % (662 кэВ)	Встроенный в ПЭВМ АЦП с ПГ обеспечением	0,03 пА/кг	2000 пА/кг
РГА-01, «Глициния», α-радиометр, эманометр	Эманационная съемка	9	Марс-373 (6 шт.)	ZnS(Ag), пластмасса	Цифровое табло	0,3 Бк/л	10^5 Бк/л

Абсолютная погрешность – это погрешность измерений Δ, выраженная в единицах измеряемой величины.

Относительная погрешность δ – это абсолютная погрешность в нормировке к истинному значению измеряемой величины, выраженная в %:

$$\delta = \frac{x - x_0}{x_0} 100\,\%.$$

Основным параметром, характеризующим рассеяние измеряемой величины, является среднеквадратическое отклонение результата измерений:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - x_0\right)^2}\,. \qquad (1.61)$$

Поскольку в эксперименте вместо истинного (заранее неизвестного) значения x_0 используют среднее арифметическое из n измерений:

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i\,, \qquad (1.62)$$

то параметр рассеяния многократно измеряемой величины

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \bar{x}\right)^2}\,, \qquad (1.63)$$

а параметр рассеяния среднего арифметического значения

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)}\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \bar{x}\right)^2}\,. \qquad (1.64)$$

В метрологии, кроме того, существуют понятия точности, правильности, сходимости и воспроизводимости измерений (ГОСТ 16263-70).

Точность отражает близость результатов измерений к истинному значению измеряемой величины.

Правильность – качество измерений, отражающее близость к нулю систематической погрешности.

Сходимость – близость друг к другу результатов повторных измерений в одинаковых условиях.

Воспроизводимость – близость друг к другу результатов измерений в различных условиях (в разное время, в различных местах, разными методами и средствами).

1.6.5. Корреляционный анализ в радиометрии

В практике геологоразведочных работ нередко приходится иметь дело со статистическими связями между сопоставляемыми величинами, когда каждому

значению некоторой величины x соответствует статистический ряд значений y, и наоборот. Типичным примером статистической связи может служить зависимость между содержанием радиоактивных и нерадиоактивных элементов в некоторых рудах. Выявление и изучение таких связей выполняется с помощью корреляционного анализа.

В зависимости от типа связи различают *линейную* корреляционную связь, когда зависимость между связанными друг с другом величинами выражается линейным уравнением вида

$$y = ax + b, \tag{1.65}$$

и нелинейные статистические связи, когда зависимость между переменными выражается уравнением степени выше первой. Уравнение (1.65) носит название уравнения линейной регрессии y на x.

Допустим, что в результате измерений получен набор точек, через которые требуется провести прямую линию и записать (1.65) с учетом численных значений коэффициентов a и b. Прямую обычно пытаются провести таким образом, чтобы точки на плоскости распределялись по возможности одинаково по обе стороны от проведенной прямой. Для этого необходимо подобрать коэффициенты a и b (и следовательно, построить прямую) с наименьшим среднеквадратичным отклонением от экспериментальных точек, что и осуществляется в *методе наименьших квадратов*.

Построение прямой линейной регрессии разбивается на этапы:

1. Составление перечня (таблицы) всех экспериментальных точек.

2. Вычисление величин Σx, Σy, Σx^2, Σy^2, $\Sigma(xy)$.

3. Вычисление коэффициентов a и b по формулам:

$$a = \frac{\sum(xy) - \frac{1}{n}\sum x \sum y}{\sum x^2 - \frac{1}{n}\left(\sum x\right)^2} = \frac{\overline{xy} - \bar{x}\bar{y}}{\overline{x^2} - (\bar{x})^2}, \tag{1.66}$$

$$b = \frac{\sum y}{n} - a\frac{\sum x}{n} = \bar{y} - a\bar{x}, \tag{1.67}$$

где символ верхней черты означает среднее значение.

4. Вычисление коэффициента корреляции выполняется по формуле:

$$r = \left\{ \frac{\left[\sum(xy) - \frac{1}{n}\sum x \sum y\right]^2}{\left[\sum x^2 - \frac{1}{n}\left(\sum x\right)^2\right]\left[\sum y^2 - \frac{1}{n}\left(\sum y\right)^2\right]} \right\}^{1/2}. \tag{1.68}$$

В табл. 1.6 показан пример обработки результатов наблюдений, вычисления a, b и коэффициента корреляции r по пяти точкам.

Таблица 1.6

Результаты статистической обработки результатов наблюдений

i	x	y	x^2	y^2	xy
1	5,0	13,7	25,0	187,7	68,5
2	7,2	18,8	51,8	353,4	135,4
3	11,3	26,4	127,7	697,0	298,3
4	23,8	53,1	566,4	2819,6	1263,8
5	45,4	98,2	2061,2	9643,2	4458,3
$n = 5$	$\Sigma x = 92{,}7$	$\Sigma y = 210{,}2$	$\Sigma x^2 = 2832{,}1$	$\Sigma x^2 = 13700{,}9$	$\Sigma(xy) = 6224{,}3$

Подставив полученные значения в формулы (1.66) - (1.68), получим параметры уравнения регрессии для нашего примера: $y = 2{,}1x + 3{,}1$ при коэффициенте корреляции $r \cong 1$, что указывает на тесную линейную связь между переменными y и x.

Экспоненциальная функция – пример нелинейного вида связи переменных y и x, которую тем не менее можно *линеаризировать*, т. е. после специальных математических преобразований представить в виде линейного уравнения. Вычислим коэффициенты регрессии для уравнения

$$y = be^{ax}. \tag{1.69}$$

Логарифмируя (1.69), имеем: $\ln y = ax + \ln b$; тогда:

$$a = \frac{\sum(x \ln y) - \frac{1}{n}\sum x \sum \ln y}{\sum x^2 - \frac{1}{n}\left(\sum x\right)^2}, \tag{1.70}$$

$$b = \exp\left[\frac{\sum \ln y}{n} - a\frac{\sum x}{n}\right]. \tag{1.71}$$

1.6.6. Статистический способ получения уравнения линейной регрессии

Выше был рассмотрен случай установления функциональной зависимости между линейно-связанными величинами y и x на основе так называемого *совместных* измерений. На практике нередко приходится иметь дело с результатами *несовместных* измерений, когда сопоставляемые величины

регистрируются автономно. В этом случае оказывается невозможным получить координатную $x_1, y_1; \ldots x_n, y_n$ функцию и ее графическое представление.

Для установления аналитической зависимости в случае несовместных измерений возможно применение способа, основанного на использовании главных параметров (кривых) распределения сопоставляемых величин x и y – средних значений $\bar{x}$, $\bar{y}$ (или модальных для кривых) и стандартных отклонений σ_x, σ_y. Сущность этого способа заключается в следующем [14].

Допустим, что между сопоставляемыми величинами x и y существует линейная зависимость (1.65). Если при этом известны средние значения $\bar{x}$, $\bar{y}$ и стандартные отклонения σ_x, σ_y, то оказывается, что коэффициенты a и b в (1.65) могут быть найдены следующим образом.

Из теории вероятности и математической статистики известны свойства математического ожидания M (среднего значения) и дисперсии D:

$\bar{y} = \mathrm{M}(ax+b) = a\mathrm{M}(x)+b = a\bar{x}+b$;

$\mathrm{D}(y) = \mathrm{D}(ax+b) = a^2\mathrm{D}(x)$, откуда:

$$a^2 = \mathrm{D}(y)/\mathrm{D}(x). \qquad (1.72)$$

Учитывая, что $\sigma = \pm\sqrt{D}$, имеем:

$$\begin{cases} \bar{y} = a\bar{x} + b \\ a = \sigma_y / \sigma_x \end{cases} \qquad (1.73)$$

Из (1.73) можно найти коэффициент b:

$$b = \bar{y} - \bar{x}\sigma_y / \sigma_x . \qquad (1.74)$$

Подставляя выражения для коэффициентов a и b в (1.65), получим следующую формулу для линейной функции $y(x)$ применительно к случаю несовместных измерений:

$$y_i = \left(x_i - \bar{x} + \bar{y}\frac{\sigma_x}{\sigma_y} \right)\frac{\sigma_y}{\sigma_x}. \qquad (1.75)$$

Расчет величин $\bar{x}$, $\bar{y}$, σ_x, σ_y выполняется на основе рядовых измерений сопоставляемых величин по формулам (1.62) и (1.63).

Обозначим через Δy и Δx разности $y_i - \bar{y}$ и $x_i - \bar{x}$ соответственно. Тогда, имея в виду (1.75), получим следующее выражение, которое можно использовать для оценки чувствительности метода в случае несовместных измерений:

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{\sigma_y}{\sigma_x}. \qquad (1.76)$$

Следует подчеркнуть, что в случае несовместных измерений оказывается принципиально невозможным нахождение коэффициента корреляции между

величинами y и x. Также имеется неоднозначность в выборе знака для коэффициента a (вследствие $\sigma = \pm\sqrt{D}$). Следовательно, этот метод не позволяет получить информацию о *тесноте* связи y и x и может давать неоднозначные предсказания значений одной величины по другой. Данный способ нахождения коэффициентов регрессии (1.65) можно рекомендовать лишь в том случае, когда априорно (заранее) известно:

- между x и y связь *существует*;
- связь *линейная*;
- можно установить *вид связи* – прямая или обратная пропорциональность ($a > 0$ или $a < 0$ соответственно).

Как правило, для выполнения этих двух условий необходимо и достаточно провести несколько совместных измерений (наблюдений) величин x_i и y_i. Количество измерений выбирают из соображений статистической значимости получаемых результатов. Например, для ответа на вопрос о существовании тесной линейной связи ($r > 0{,}9$) достаточно выполнить 5-7 измерений, а установление наличия слабой нелинейной связи потребует, как минимум, 30-40 измерений.

Рассмотренный метод очень удобен для градуирования геофизической аппаратуры (особенно нескольких приборов и в разное время), когда между аппаратурным параметром и измеряемой величиной существует линейная связь. В этом случае стандартным способом достаточно выполнить градуировку лишь одного прибора, а градуировку остальных выполнить с использованием формул (1.75) – (1.76).

МИНОБРНАУКИ РФ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

ПРАКТИЧЕСКОМ РАБОТАМ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

«ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ

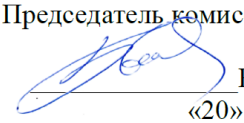
И АКУСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СКВАЖИН»

Специальность:
21.05.03 Технология геологической разведки
Специализация:
"Геофизические методы исследования скважин"

форма обучения: очная, заочная

Автор: Пыжьянов Ю.Б., ст. препод.

ОДОБРЕНО
методической комиссией
факультета геологии и геофизики
Председатель комиссии



В. И. Бондарев
«20» марта 2020 г.

Екатеринбург

2020

Приложение к рад. №2 **Работа №** (1)

Определение глинистости коллекторов по данным ГК

Глинистость коллекторов характеризуется объемным $C_{гл}$ или весовым коэффициентом глинистости $K_{гл}$, % Определение глинистости по данным ГК базируется на корреляционной связи между радиоактивностью осадочных пород и их глинистостью.

Общая радиоактивность осадочной породы $q_{пор}$ может быть представлена как сумма:

$$q_{пор} = (1 - C_{гл}) \cdot q_{ск} + C_{гл} \cdot q_{гл}, \qquad (*)$$

где $q_{ск}$ и $q_{гл}$ – удельная радиоактивность минерального скелета породы и глины.

Из этого соотношения (*) следует, что в тех случаях, когда $q_{ск}$ и $q_{гл}$ не зависят от глинистости породы, связь $q_{пор} = f(C_{гл})$ является линейной.

Однако, в общем случае содержание в глинах тонкодисперсной фракции, обладающей наиболее высокой способностью сорбировать радиоактивные элементы, коррелируется с общей глинистостью породы и таким образом меняется в зависимости от $C_{гл}$. В результате с увеличением содержания глин растет и их активность $q_{гл}$, а корреляционная связь $q_{пор} = f(C_{гл})$ оказывается нелинейной и не одинаковой для различных месторождений или районов (рис. 1).

Для того, чтобы использовать эти зависимости с целью определения $C_{гл}$ по результатам ГК, последние должны быть выражены (нормированы) в единицах радиоактивности горных пород.

При невозможности это выполнить, для определений глинистости используют так называемый «двойной разностный параметр» - $\bar{\Delta} J\gamma$.

$$\bar{\Delta} J\gamma = \frac{J_\gamma^x - J_\gamma^{min}}{J_\gamma^{max} - J_\gamma^{min}} \qquad (**)$$

Величины J_γ^x, J_γ^{min}, J_γ^{max} соответствуют интенсивностям, зарегистрированными над исследуемым пластом – коллектором (J_γ^x), пластом чистых кварцевых песчаников или известняков с $C_{гл} = 0$ (J_γ^{min}) и пластом глин, характеризующимся максимальной активностью J_γ^{max}.

Все эти величины перед подстановкой в формулу (**) должны быть приведены к одинаковым нормальным условиям, т.е. исправлены за поглощение гамма-излучения в буровом растворе и обсадных трубах.

Если скважинные условия (диаметр скважины, наличие или отсутствие обсадки) одинаковы для исследуемого и опорных пластов, поправками за эти условия можно пренебречь.

В качестве опорного горизонта с J_γ^{max} выбирают пласт глин, залегающий в непосредственной близости от исследуемого коллектора. Этим предопределяется однотипность глинистого материала в опорном и исследуемом пласте и, следовательно, равенство удельной радиоактивности $q_{гл}$ в этих пластах (В.В. Ларионов, 1969).

Зависимость $\bar{\Delta} J\gamma$ от Сгл для песчанистых коллекторов Тюменской области представлена на рис. 2.

Поскольку содержание глинистого материала ($C_{гл}^{оп}$) в опорном горизонте может оказаться не 100%, а меньше, то вычисленный параметр $\bar{\Delta} J\gamma$ умножают на поправочный коэффициент К, равный величине $C_{гл}^{оп}/100$. Для упрощения определений на палетке рис. 2 нанесены кривые, соответствующие поправочным коэффициентам от 0,9 до 0,4. В случае различия скважинных условий для исследуемого и опорных пластов величину поправочного коэффициента за диаметр скважины η_d можно определить по номограмме рис. 3., а за наличие обсадных колонн $\eta_{ок}$ – по рис. 4.

Следует учитывать, что в коллекторах полимиктового состава повышенная радиоактивность может быть связана не только с глинистостью, но и с наличием калиевых полевых шпатов в минеральном скелете коллектора.

Из-за неконтролируемых вариаций соотношения кварц – глина – полевой шпат связь естественной радиоактивности с глинистостью пород становится неоднозначной (Л.И. Померанц и др. 1981).

Задание

1. Используя диаграммы всего комплекса ГИС, определите положение коллекторов в представленном интервале скважины. Пронумеруйте их арабскими цифрами.

2. Выберите опорные пласты для всего представленного фрагмента разреза по максимальным и минимальным показаниям на диаграмме ГК - J_γ^{min} и J_γ^{max}.

3. Занесите в таблицу значения J_γ^{min}, J_γ^{max}, J_γ^{x} всех пластов – коллекторов.

Пласт	Jγ	η_d	$\eta_{ок}$	$\eta_d \cdot \eta_{ок} \cdot J\gamma$	ΔJ_γ^{x}	ΔJ_γ^{on}	$\overline{\Delta}$ Jγ	$C_{гл}$, %
I оп								
II оп								
1 х								
2 х								
3 х								

4. В случае необходимости определите по номограммам рис. 2 и 3 величину поправочных множителей за диаметр скважины η_d и наличие обсадных колонн $\eta_{ок}$ и введите их.

5. Подсчитайте

$$\Delta J_\gamma^{on} = J_\gamma^{max} - J_\gamma^{min} \quad \text{и} \quad \Delta J_\gamma^{x} = J_\gamma^{x} - J_\gamma^{min}$$

6. Рассчитайте двойной разностный параметр

$$\overline{\Delta}\,J\gamma = \frac{\Delta J_\gamma^{x}}{\Delta J_\gamma^{on}} = \frac{J_\gamma^{x} - J_\gamma^{min}}{J_\gamma^{max} - J_\gamma^{min}}$$

7. По номограмме рис. 2 найдите глинистость всех выделенных коллекторов. При этом примите глинистость I опорного горизонта $C_{гл}^{on} = 90\%$.

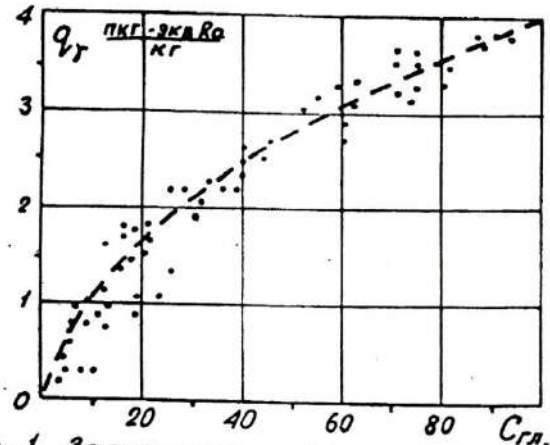


Рис. 1. Зависимость γ-активности песчано-глинистых пород от их глинистости

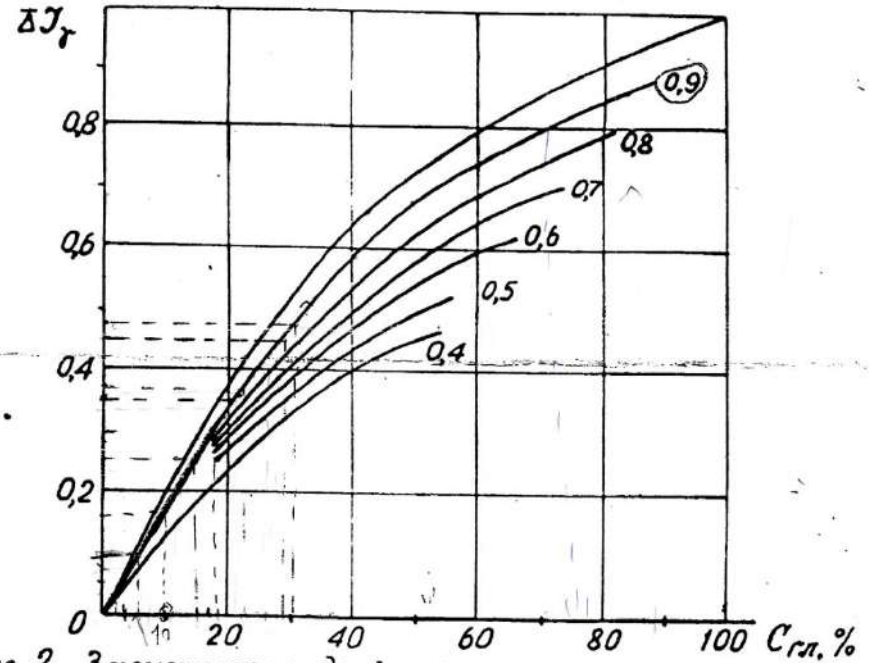


Рис. 2. Зависимость двойного разностного параметра от глинистости. Шифр кривых – $C_{гл}$ опорного горизонта

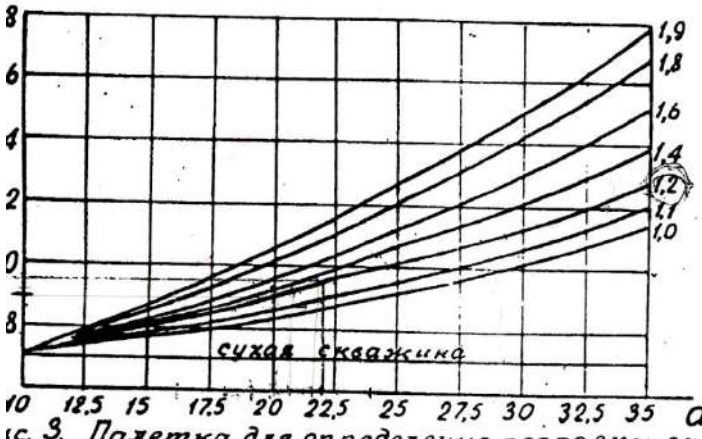


Рис. 3. Палетка для определения поправки за диаметр скв. Шифр кривых – плотность бурового раствора, г/см³ (по Р. Дебранду, 1972)

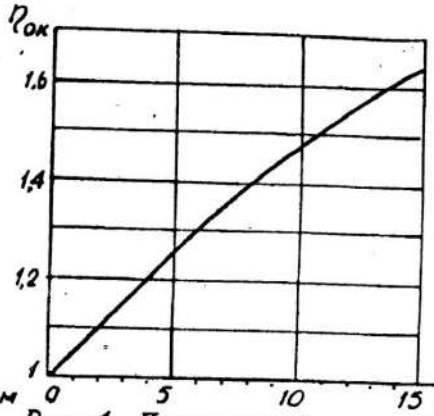


Рис. 4. Палетка для определения поправки за обсадные трубы

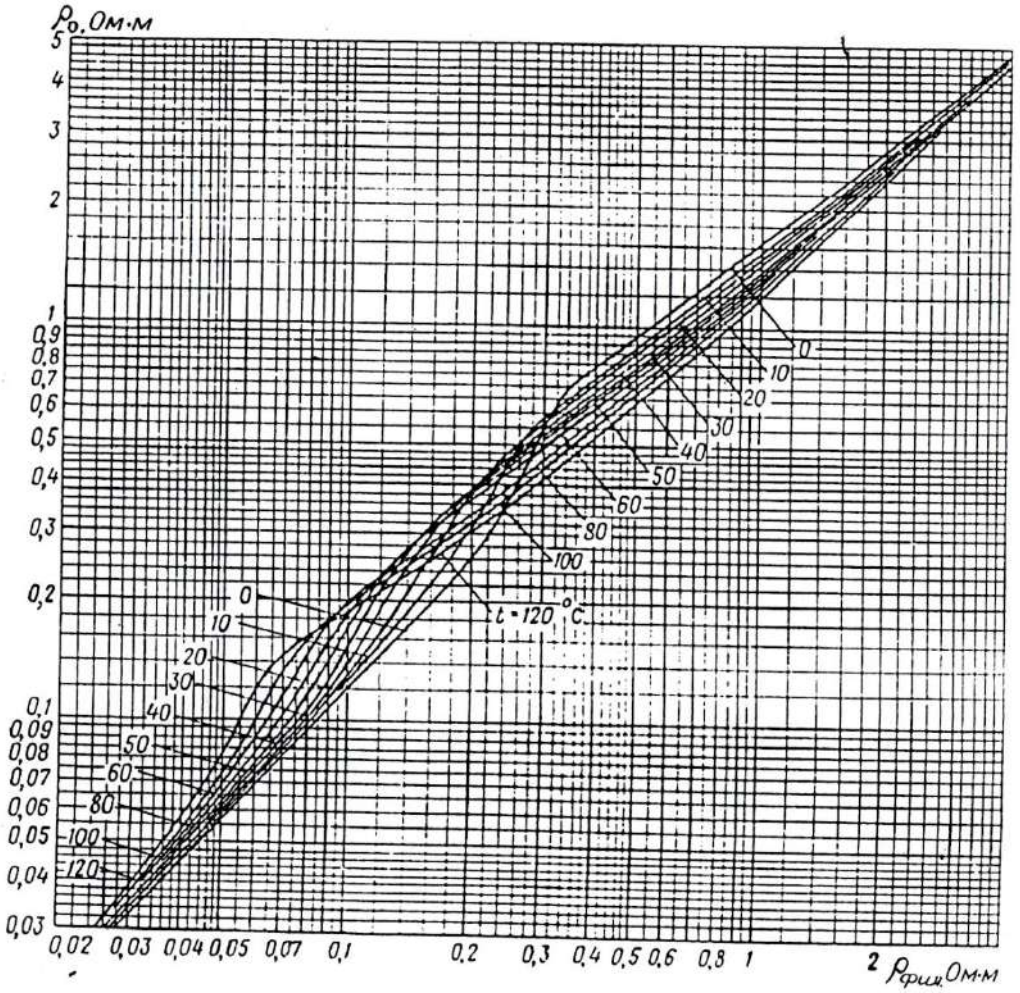
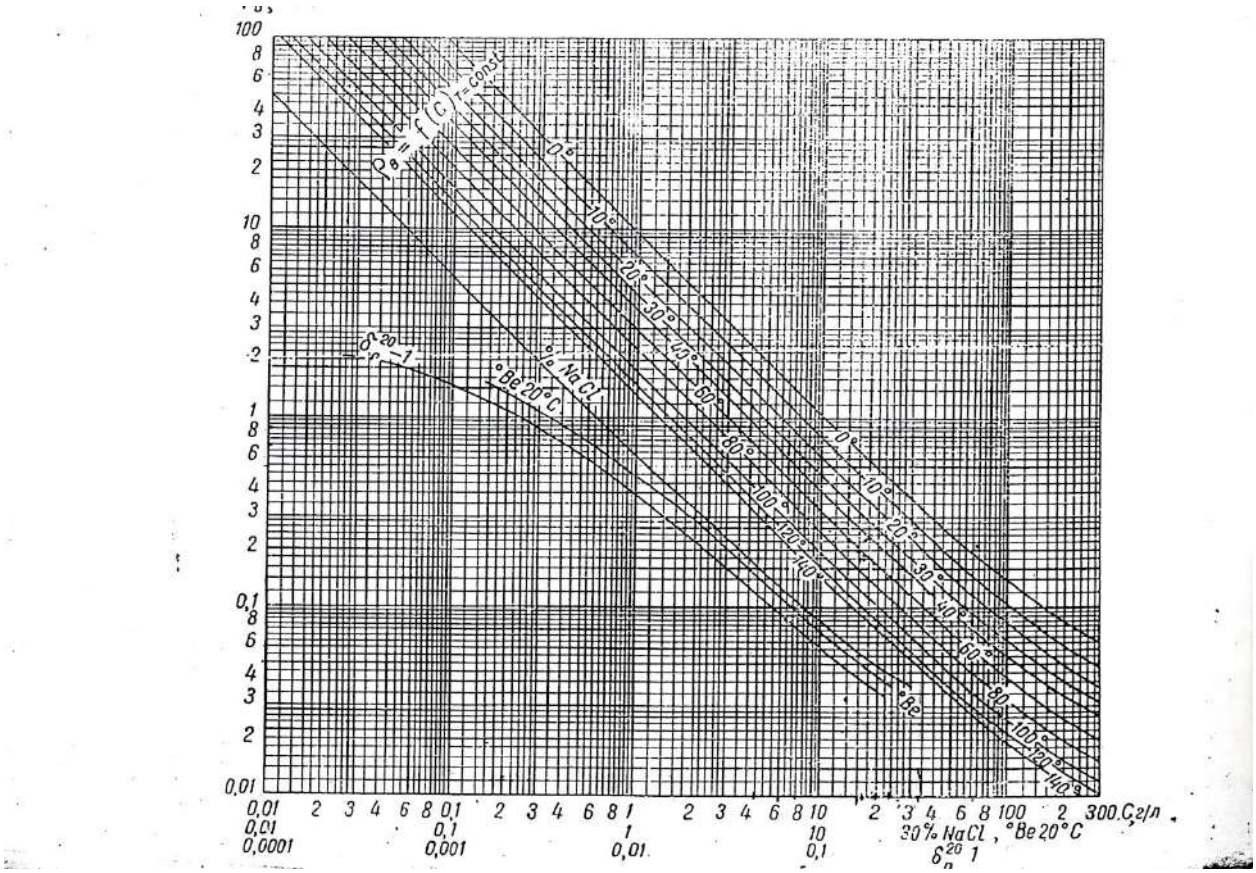


Рис. 10.15. Номограмма для определения сопротивления фильтрата бурового раствора в зависимости от сопротивления и температуры смеси

(Акрамова М.Г.)


100
8
6
4
3
2
10
8
6
4
3
2
1
8
6
4
3
2
0,1
8
6
4
3
2
0,01
0,01 2 3 4 6 8 0,1 2 3 4 6 8 1 2 3 4 6 8 10 2 3 4 6 8 100 2 300.C 2/n
0,01 0,1 1 10
0,0001 0,001 0,01 0,1
% NaCl
°Be 20°C
δ 20 1
°Be
0°
10°
20°
30°
40°
60°
80°
100°
120°
140°
30% NaCl , °Be 20°C
δ 20 1

Работа № 3

Интерпретация результатов акустического видеокаротажа (АВК)

Физическая сущность акустического видеокаротажа состоит в облучении стенки скважины короткими ультразвуковыми импульсами, испускаемыми пьезоэлектрическим преобразователем, расположенным на оси скважины, и регистрации тем же преобразователем сигнала, отраженного от стенки скважины. Амплитуда принятого сигнала зависит от состояния отражающей поверхности, а время его прихода – от расстояния между источником и отражающей поверхностью (стенкой скважины). Преобразователь в скважинном приборе приводится во вращение и делает несколько оборотов в минуту. Принятые сигналы усиливаются и поступают в наземную аппаратуру, где обрабатываются на цифровом регистраторе и выводятся на компьютер, который фиксирует принятый акустический сигнал на экране дисплея и принтере в виде изображения внутренней поверхности скважины в акустических волнах в амплитудном или временном параметрах. Плотность засветки отдельных участков изображения зависит от отражающих свойств стенки скважины. Гладким стенкам соответствуют светлые участки, трещиноватым зонам – темные полосы.

В случае отдельных трещин на круговых изображениях стенки скважины в акустических волнах появляются темные полосы. При пересечении трещины скважиной под прямым углом темные полосы прямые и горизонтальные, при пересечении под острым углом полосы имеют форму синусоиды. При наличии записи в крупном масштабе глубин (1:20 или 1:50) появляется возможность определить ширину трещины и угол (α) встречи ее с осью скважины:

$$\alpha = arctg\frac{\Delta H}{d},$$

где ΔH – разница глубин максимума и минимума синусоиды, а d – диаметр скважины.

Значение ширины трещин дает возможность оценить коэффициент трещинной пустотности $К_{тр}$ отдельных интервалов горных пород в скважинах.

Принимая допущение, что диаметр скважины в пределах этих интервалов не изменяется, можно полагать, что $K_{mp} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} h_i}{L}$, где $\sum_{i=1}^{i=n} h_i$ - суммарная ширина трещин на исследуемом интервале, а L - длина этого интервала.

Далее, можно рассчитывать модуль трещиноватости М, т. е. количество трещин, приходящихся на 1 пог. м.

В обсаженных скважинах АВК позволяет выявить все дефекты обсадных труб: трещины, перфорационные отверстия, участки коррозии, зоны смятия и т. п.

На рис.1 представлено изображение внутренней поверхности 9^{II} колонны, на котором хорошо видна зона смятия колонны в интервале 2865-2880 м и косая желобообразная выработка стенки в интервале 2880-2940 м.

Для примера на рис. 2 представлены изображения участков внутренней поверхности в амплитудном параметре (АВК-А), полученные в скважине 4С, которая была пробурена на Юбилейном месторождении медно-колчеданных руд.

В интервале 950,4 – 950,8 м (рис.2а) отчетливо выделяется одиночная трещина имеющая ширину около 3 мм на изображении, что соответствует 4,8 см в натуре.

Трещина на видеоизображении имеет синусоидальную форму, что является следствием наклонного положения ее относительно оси скважины. Амплитуда синусоиды 15 мм, что соответствует ΔH=24 см в натуре.

Учитывая, что диаметр скважины равен 9^{II} =23 см,

$$tg\alpha = \frac{\Delta H}{d} = \frac{24}{23} = 1{,}04,$$

а угол встречи скважины и трещины $\alpha \approx 45^0$.

На рис. 2б показано, как по результатам акустического видеокаротажа фиксируется зона дробления в интервале 926,4-927,2 м в той же скважине 4С: большое количество темных полос различной ширины. Суммарная ширина этих полос $\sum_i^n h_i = 20\,мм$, что соответствует 32 см в натуре, так что коэффициент трещинной пустотности в этом интервале

$$K_{тр} = \frac{\sum_i^n h_i}{L} = \frac{32}{80} = 0{,}4.$$

Аппаратура для акустического видеокаротажа как обсаженных, так и необсаженных нефтяных скважин носит название САТ – скважинных акустических телевизоров, аппаратура для скважин меньшего диаметра, разработанная в институте «ВНИИГИС» (г. Октябрьский), называется АВК-42 (42 – диаметр скважинного прибора, мм).

Общий недостаток всех видов аппаратуры АВК – это невозможность определить ориентировку трещин, а также зон нарушений в обсадных колоннах относительно стран света или относительно апсидальной плоскости скважины.

ЗАДАНИЕ

1. По рис. а рассчитать коэффициент объемной трещинной пустотности $K_{тр}$.
2. По рис. б и в найти угол α – встречи скважины с одиночными трещинами.
3. Составить отчет о проделанной работе.

Составил И. Г. Сковородников

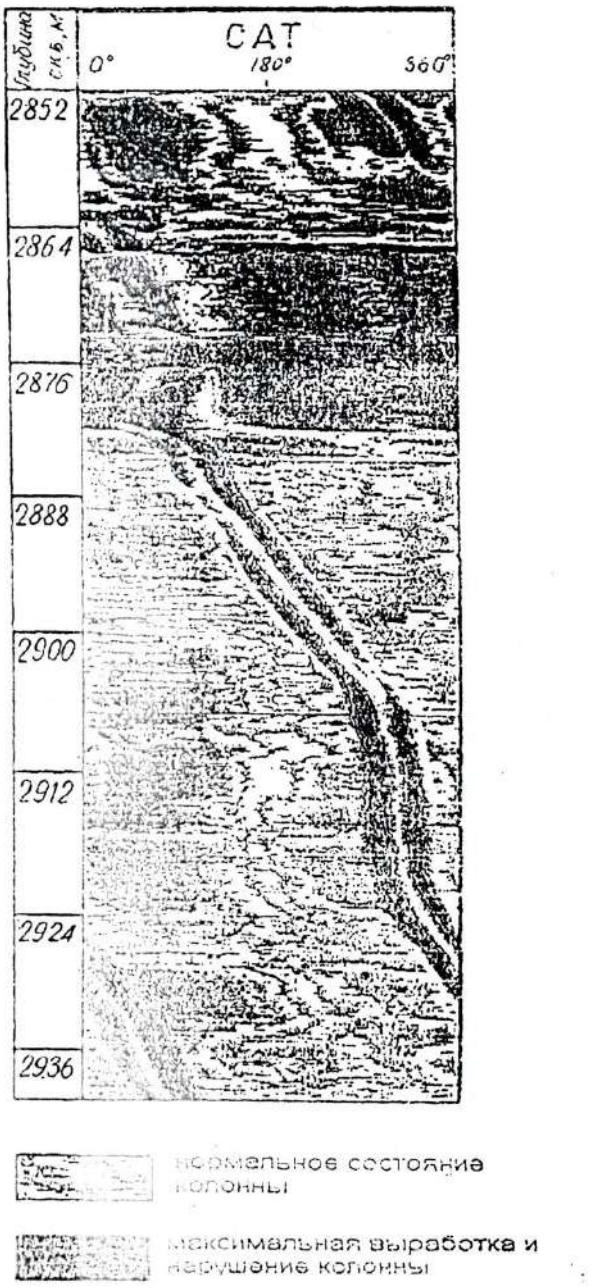


Рис. 1 Черно-белая копия результатов акустической дефектометрии обсадной колонны в одной из скважин Оренбургского НГКМ. В интервале 2865-2880 м – зона смятия колонны, в интервале 2880-2930 м – желобообразная выемка. (По материалам Е. А. Ишковой)

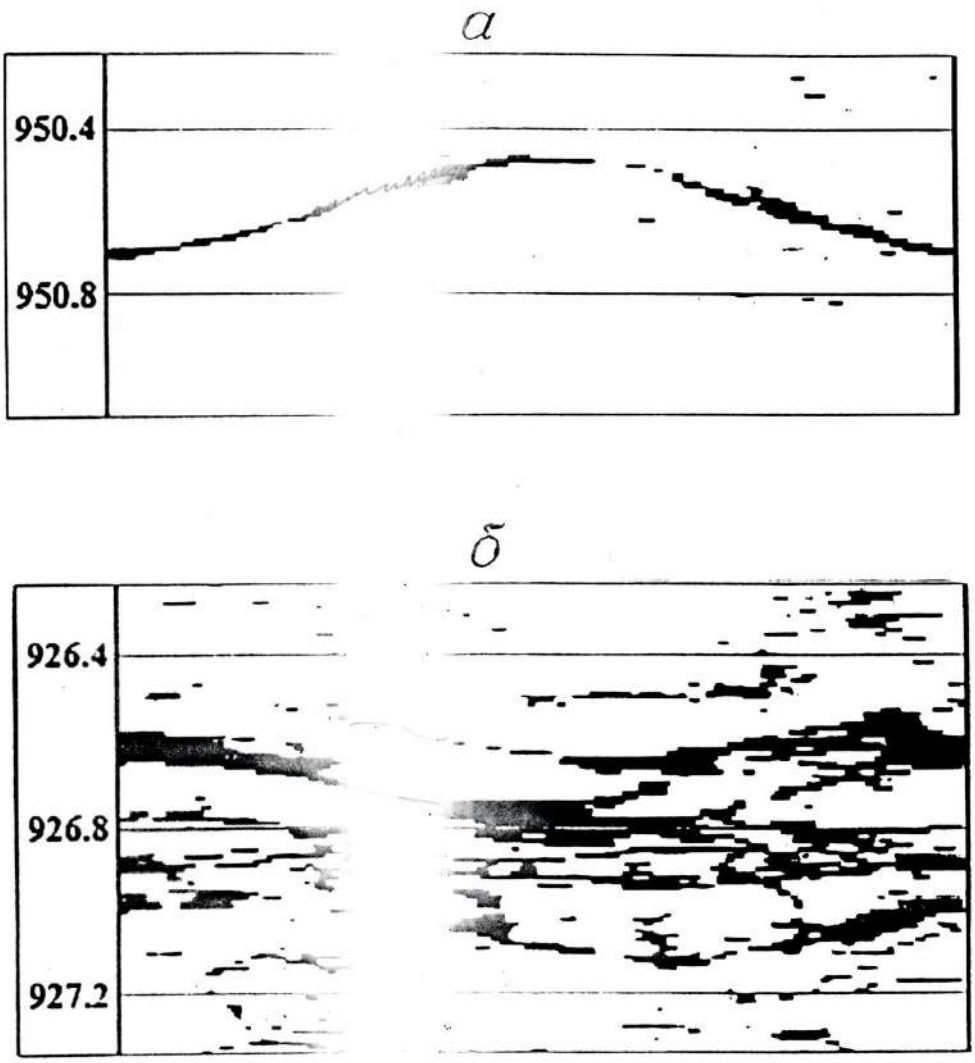
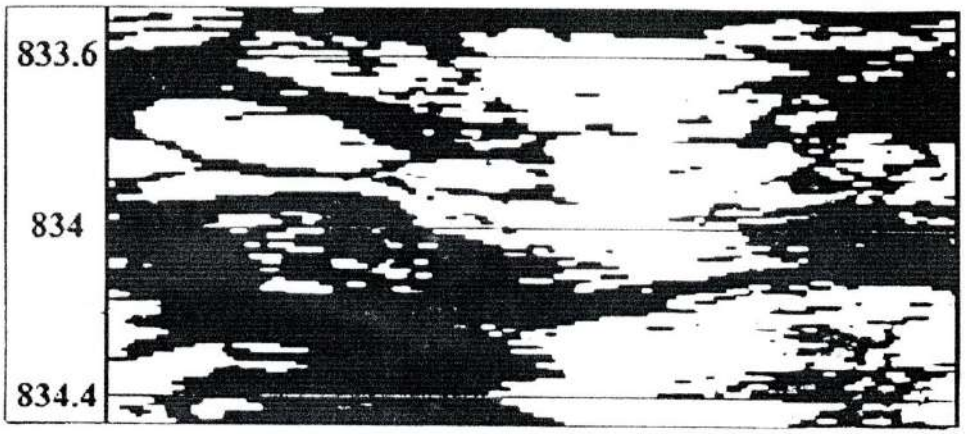
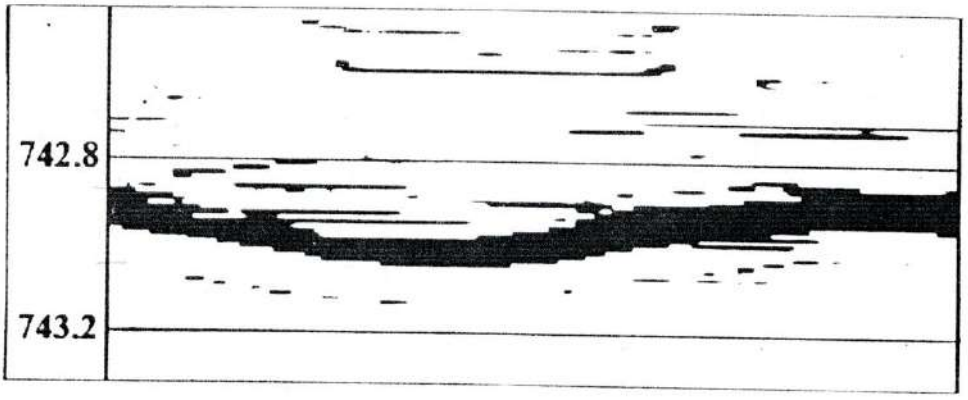


Рис. 2. Результаты акусти[ч] . ...деокаротажа в открытом стволе скважины 4С Юбилейного медноколчеданного [м] . ...ления (по материалам ОАО НПП «ВНИИГИС»): а – одиночная трещина; б – трещи[на] зо[на]

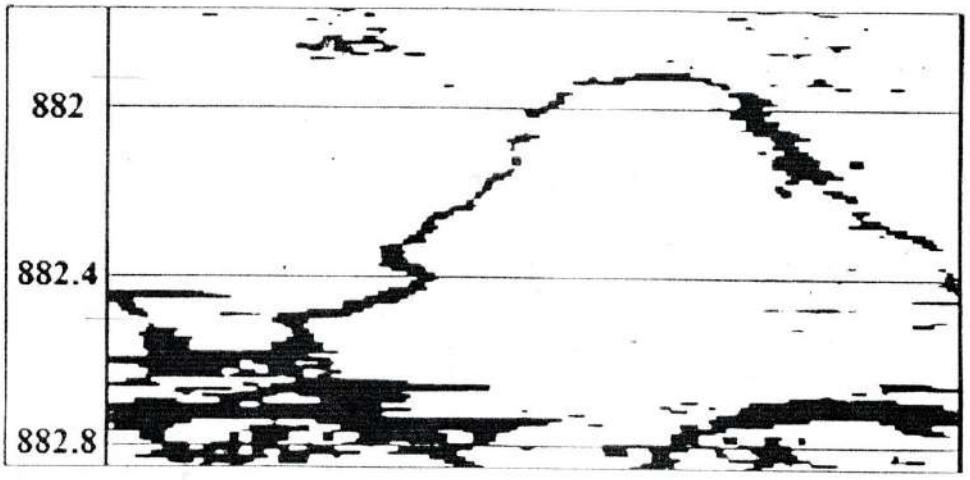
а



б

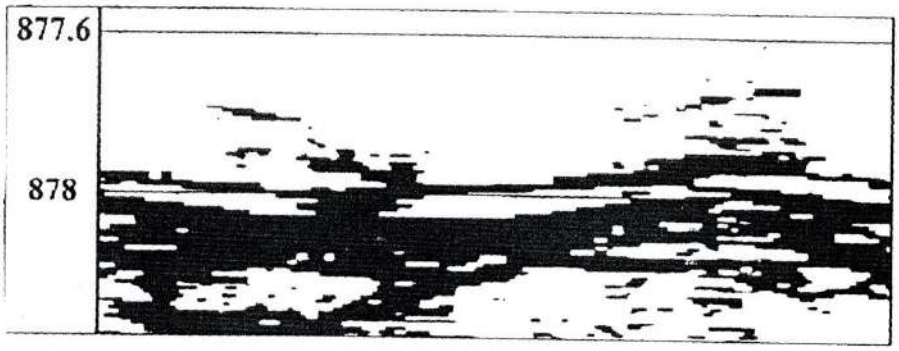


в

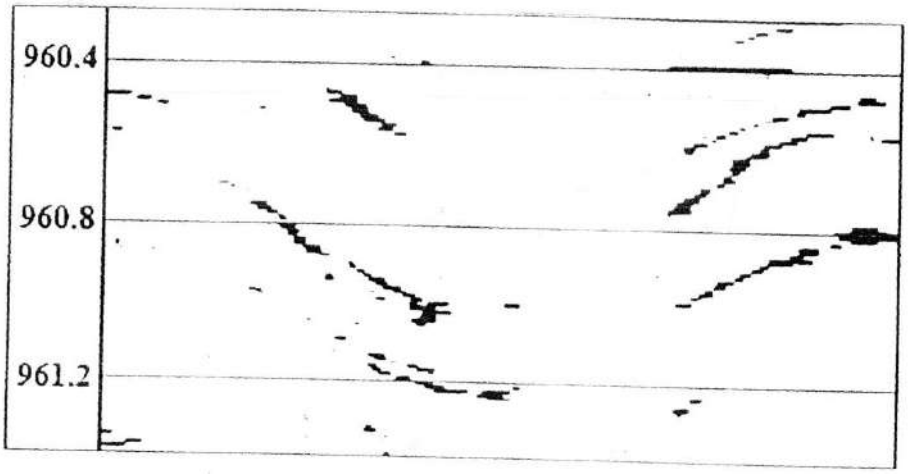


II вар, рис. №3

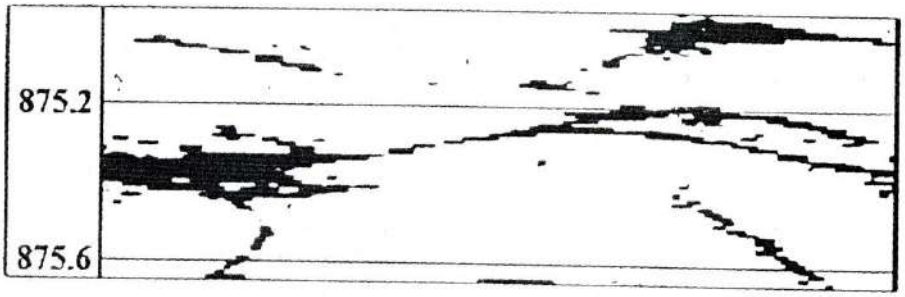
а



б

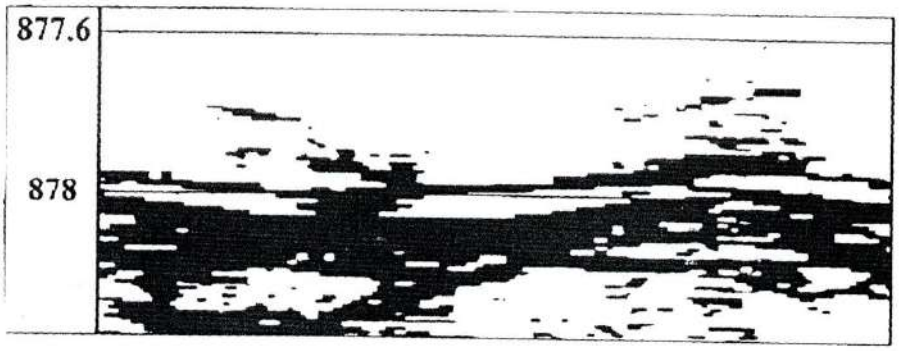


в

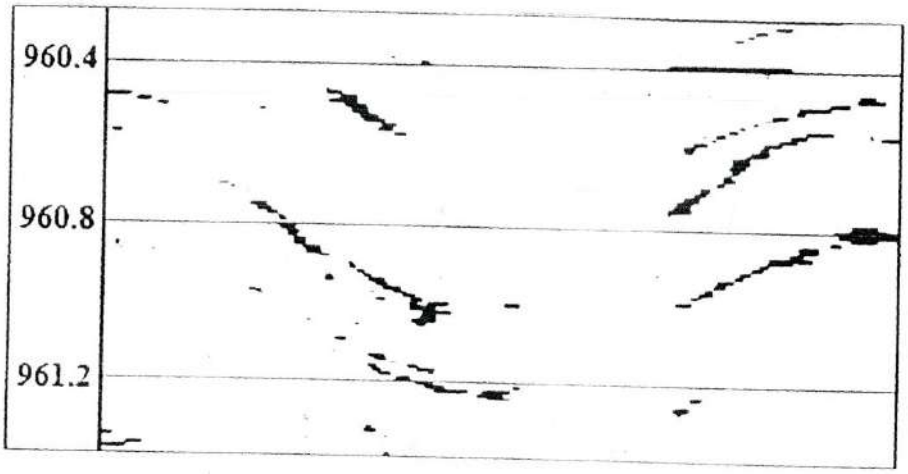


II вар, рис. №3

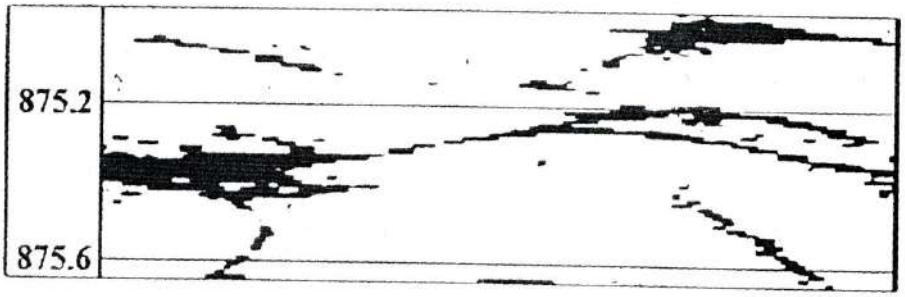
а



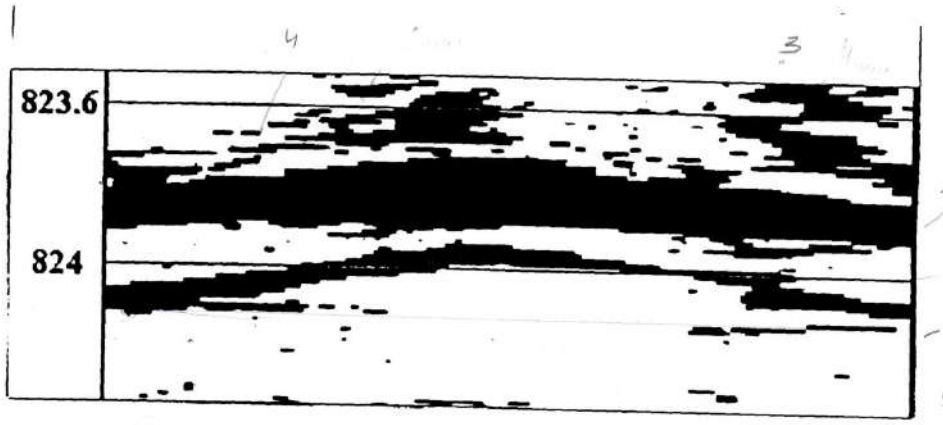
б



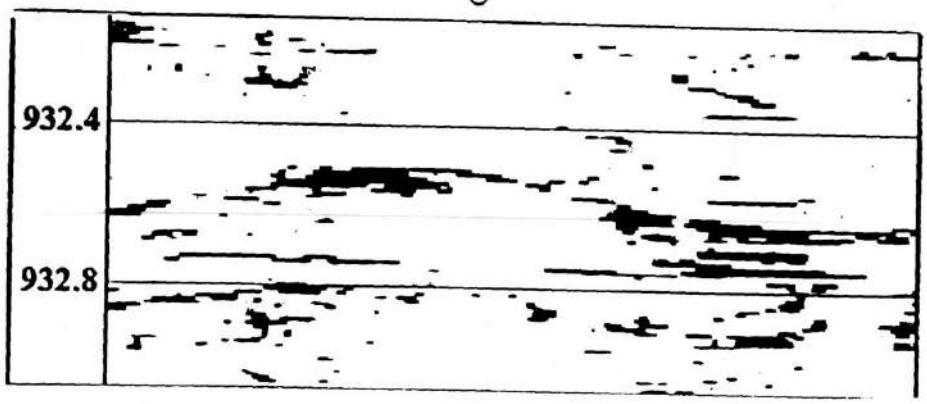
в



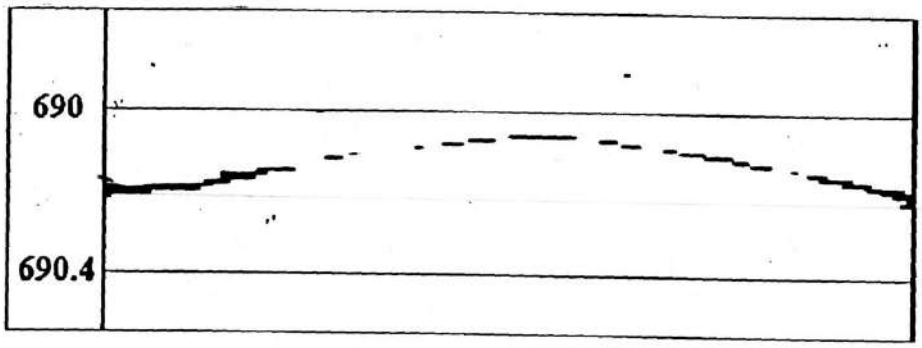
а



б



в



Работа № 4

Интерпретация результатов акустической цементометрии

Эксплуатационные скважины на нефтяных и газовых месторождениях по окончании бурения обсаживают стальными колоннами, пространство между колонной и горной породой заполняют цементом высоких марок, и только после этого вскрывают продуктивные пласты, проделывая с помощью перфораторов отверстия в обсадной колонне (ОК), цементном камне (ЦК) и продуктивном пласте, чтобы открыть доступ нефти или газу, содержащимся в пласте, в скважину.

Цементирование ОК необходимо для предотвращения затрубных перетоков подземных вод из ниже- и вышележащих пластов в продуктивные горизонты и для укрепления обсадных колонн.

Качество цементирования характеризуется:

- высотой подъема цемента в затрубном пространстве (ЗТП);
- полнотой и равномерностью заполнения ЗТП цементом;
- степенью сцепления цементного камня с трубой и с горной породой.

Наиболее информативным методом является акустическая цементометрия – АКЦ. Решение всех перечисленных выше задач может быть получено с помощью простейшего 2-х элементного акустического зонда, содержащего 1 излучатель и 1 приемник упругих волн.

Расстояние от излучателя до приемника (длина зонда) – 2,5 м.

Излучатель вырабатывает пачки ультразвуковых колебаний с частотой 25 кГц. Частота следования пачек – 25 Гц или 12,5 Гц. Сигналы с приемника усиливаются и передаются на поверхность, где обрабатываются и фиксируются в виде трех диаграмм: $A_к$ – амплитуды волны, пришедшей по колонне, $A_п$ – амплитуды полны, пришедшей по породе и T – времени прихода волны с наибольшей амплитудой.

При этом временно́е окно для регистрации $A_к$ открывается через 480 мкс после начала излучения акустического импульса и закрывается после прихода трех полных периодов волны по колонне.

Временное окно для регистрации амплитуды упругой волны, пришедшей по породе $A_п$, открывается одновременно с окном $A_к$, а вот закрывается значительно позднее, поэтому в этом окне регистрируются колебания, пришедшие и по колонне и по породам.

Поскольку амплитуда первого вступления волны обычно меньше амплитуды последующих колебаний, то в АКЦ регистрируется величина ($A_к$ или $A_п$), характеризующая амплитуду нескольких колебаний, а именно, – выпрямленный сигнал 3-х периодов волны в условных единицах мВ, в виде непрерывной кривой.

Кроме диаграмм T, $A_к$ и $A_п$ в аппаратуре предусмотрена возможность регистрации волновых картин ВК и фазокорреляционных диаграмм – ФКД с определенным шагом дискретизации по глубине.

Имеются программы для обработки и интерпретации данных АКЦ на ЭВМ.

Если колонна труб не имеет сцепления с цементом, свободна, то упругие колебания, возбужденные в ОК, не передаются цементному камню, и продольная упругая волна $A_к$ распространяется по колонне со скоростью 5200-5400 м/с при относительно небольшом ослаблении. Значение T при этом минимально и составляет около 480 мкс.

В случае качественной заливки и при хорошем сцеплении между колонной и цементом имеется акустический контакт, упругие колебания в колонне возбуждают такие же колебания в цементном камне, в связи с чем большая часть их энергии рассеивается на пути между источником и приемником. Приемник регистрирует значительное ослабление и быстрое затухание этих колебаний, а время T увеличивается.

Хорошее сцепление цемента со стенкой скважины, т.е. с горной породой, проявляется повышенным временем T пробега волны со значительной амплитудой колебаний $A_п$, т.к. в этом случае большая часть энергии упругих колебаний распространяется по горной породе с характерной для этой породы скоростью. Для большинства осадочных горных пород эта скорость меньше, чем скорость в стальных трубах (см. табл.21.1.). Исключение составляют только крепкие, окремнелые известняки, для которых $V_р$ достигает 7100 м/с. Таким образом, совместное рассмотрение кривых $A_к$ и T позволяет определить высоту подъема цемента в затрубном пространстве (ЗТП), полноту заполнения ЗТП цементом, качество сцепления цемента с колонной, а при благоприятных условиях – и с горной породой.

На рис. 1 представлены результаты АКЦ для нескольких типичных случаев состояния цементного камня (или его отсутствия).

Рис. 1 *а* – «свободная труба», упругие волны распространяются только по трубе, не передаваясь ни цементному камню, ни горной породе. Время T прихода волны с наибольшей амплитудой минимально (порядка 480 мкс). Значения $A_п$ и $A_к$ – максимальны. На всех трех диаграммах уверенно фиксируются соединительные муфты на колонне обсадных труб.

Против муфтовых соединений колонны наблюдаются уменьшение амплитуды $A_к$ в связи с рассеянием энергии на резьбовых соединениях и увеличение времени T (И. Г. Пермяков, Е. Н. Шевкунов, 1976).

Рис. 1 *б* – затрубное пространство заполнено цементным камнем, который имеет хорошее сцепление как с ОК, так и с горной породой. Время T максимально, $A_к$ близка в нулю, $A_п$ – максимально и дублирует диаграмму акустического каротажа в открытом стволе.

Рис. 1 *в* – неполное заполнение ЗТП цементным камнем. Показания T минимальное, диаграммы $A_к$ и $A_п$ имеют непостоянные, промежуточные показания.

Рис. 1 г – цементный камень заполняет все ЗТП, но отсутствует сцепление между цементным камнем и породой. Упругие колебания через ОК передаются цементу и распространяются в основном по цементному камню. Соответственно показания $A_к$ и $A_п$ минимальны, показания T, наоборот, имеют

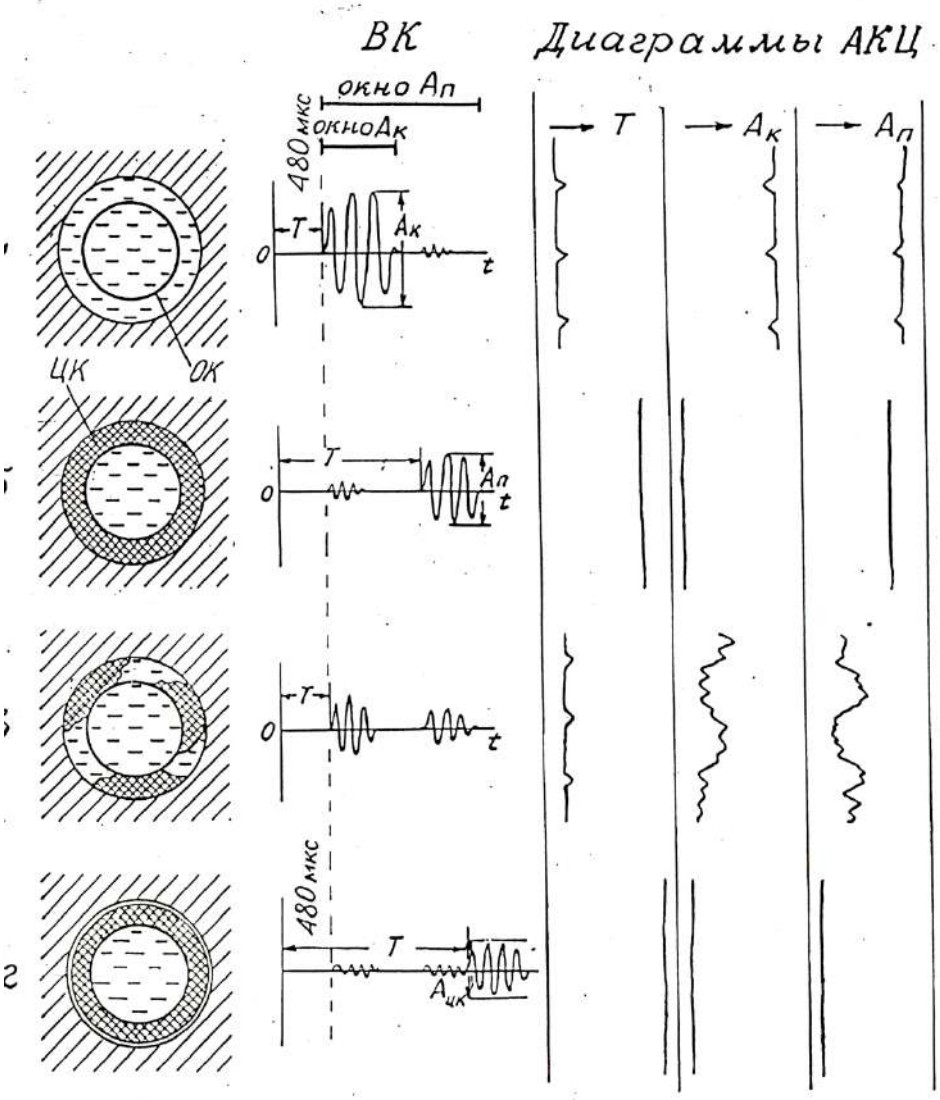


Рис. 1. Результаты акустической цементометрии:

а – при отсутствии цемента в затрубном пространстве (ЗТП); б – при полном заполнении затрубного пространства и хорошем сцеплении цементного камня (ЦК) с обсадной колонной (ОК) и с породой; *в* – при частичном заполнении ЗТП и плохом сцеплении цементного камня с колонной; *г* – при плохом сцеплении цементного камня с породой.

максимальную величину, т.к. скорость упругих волн в цементном камне меньше, чем в ОК и в большинстве горных пород.

В геологических разрезах, представленных высокоскоростными породами ($V_p \geq 5400$ м/с), такими как карбонатные отложения, интерпретация акустической цементометрии затруднена, т. к. и при плохом и при хорошем качестве цементирования первой приходит волна распространяющаяся по породам, и показания на кривой T будут минимальными в обоих случаях.

На рис. 2 приведены результаты акустической цементометрии одной из скважин, пробуренных в Западной Сибири. Верхняя часть представленного фрагмента скважины от 2914,5 до 2924,5 м характеризуется плохим сцеплением цементного камня с обсадной колонной. Этому интервалу соответствуют минимальные значения времени T на уровне 480 мкс, высокие значения амплитуды $A_к$ и такие же значения $A_п$. На глубине 2919,5 – 2920,5 м отмечается участок свободной колонны по максимальным показаниям $A_к$. Нижняя часть фрагмента – от 2926 м и ниже, до 2946 м характеризуется хорошим сцеплением цементного камня с колонной и горной породой. Здесь повышено время T и повышены значения амплитуды волны по породе $A_п$, амплитуда волны по колонне $A_к$ – нулевая.

Внутри этого интервала выделяются два метровых по длине участка с частичным сцеплением – глубинах 2937 и 2941 м. Им соответствуют минимальные значения T, увеличение величины $A_к$ и уменьшение $A_п$.

Поскольку акустическая цементометрия не позволяет определить эксцентричность расположения обсадных колонн в скважине, то ее приходится дополнять гамма-гамма-цементометрией.

Задание

1. Внимательно изучите выданные Вам материалы.
2. Установите местоположение интервалов неполного заполнения затрубного пространства цементом и некачественного сцепления цемента с трубой и с горной породой.
3. Вынесите результаты на интерпретационную колонку в соответствии с условными обозначениями на рис. 2.

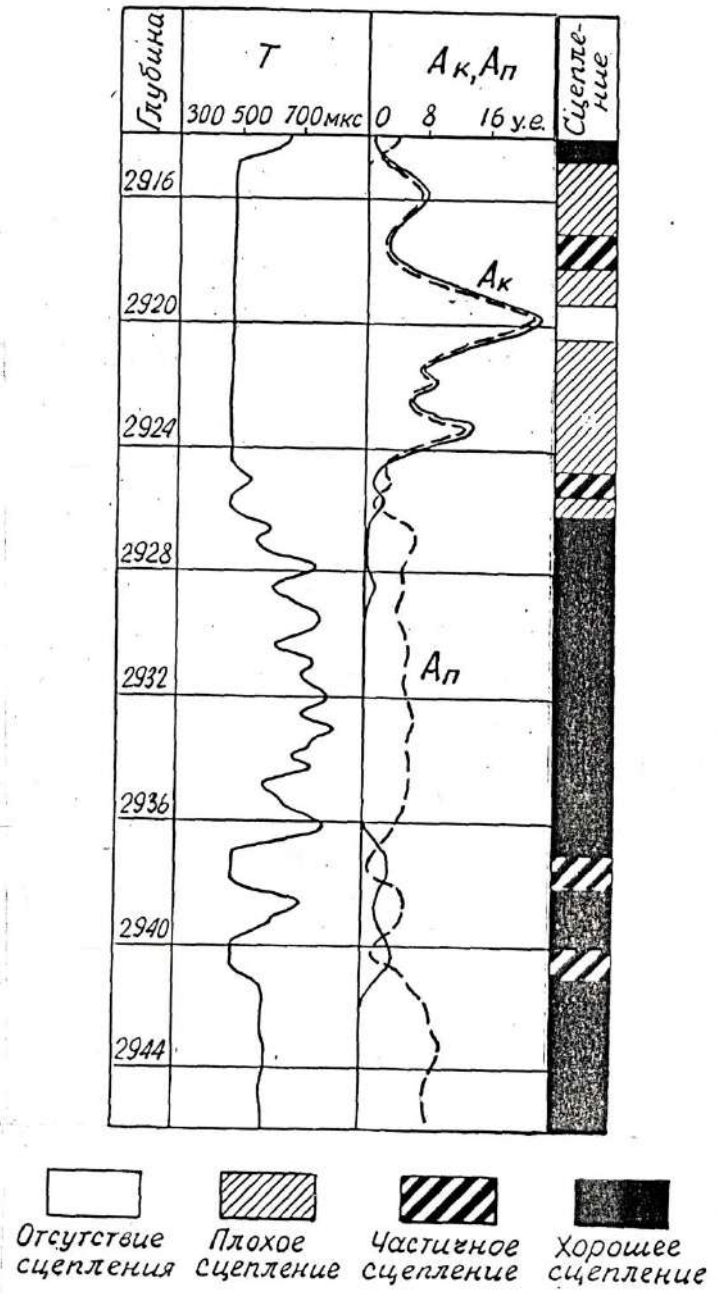
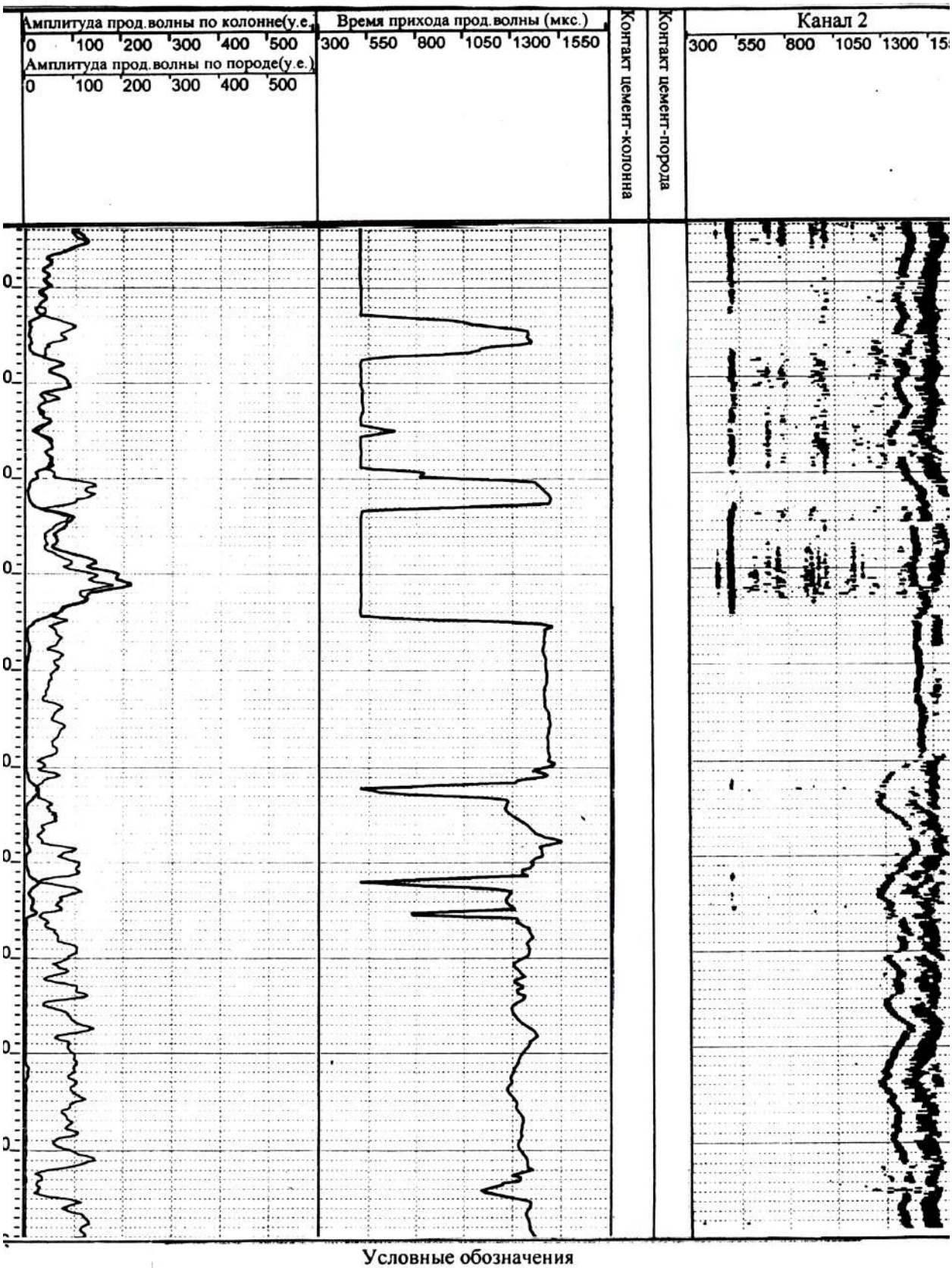
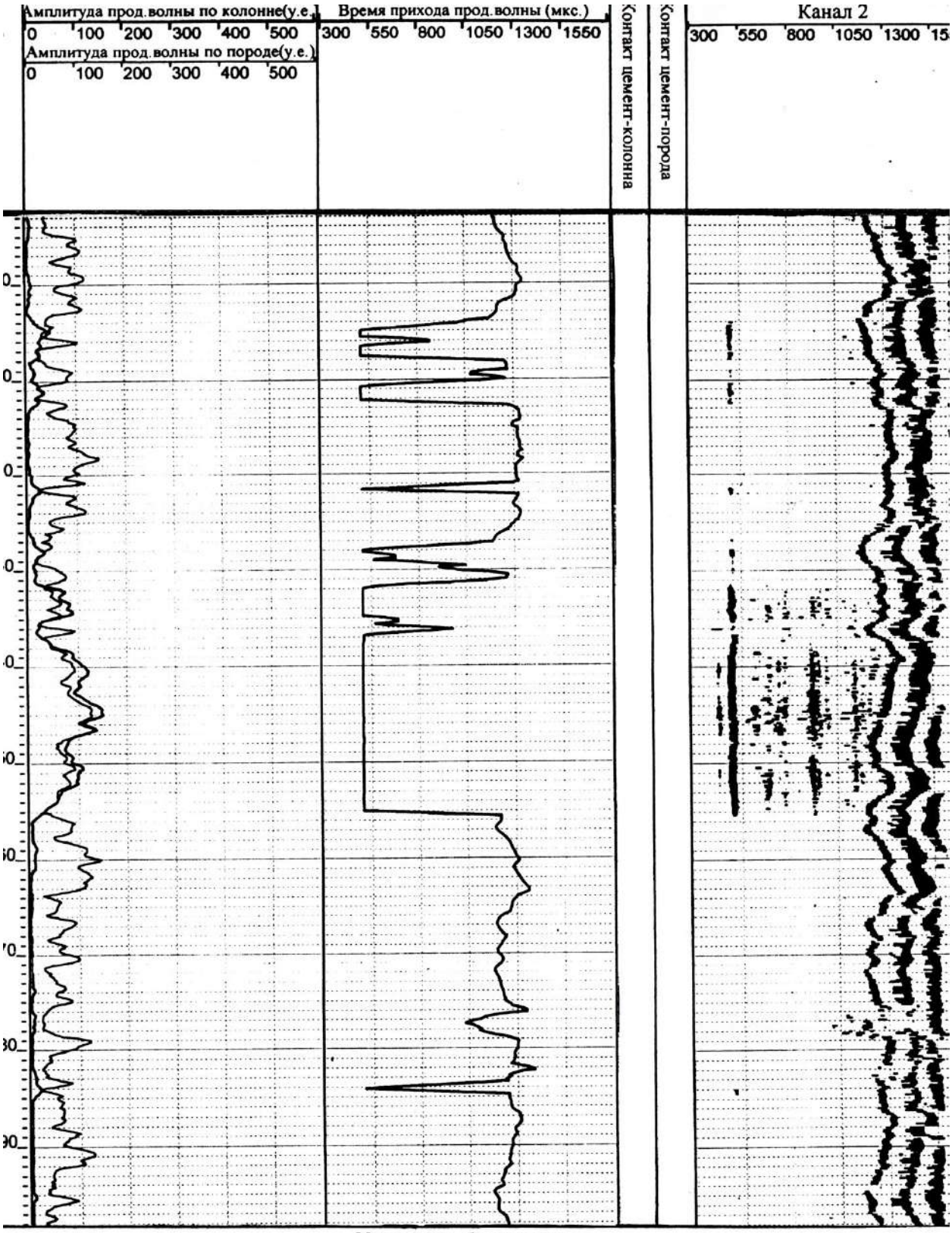


Рис. 2. Результаты акустической цементометрии и ее машинной интерпретации в скв. 4549 Повховской площади (по материалам ОАО «Красноярское УГР»)



Условные обозначения

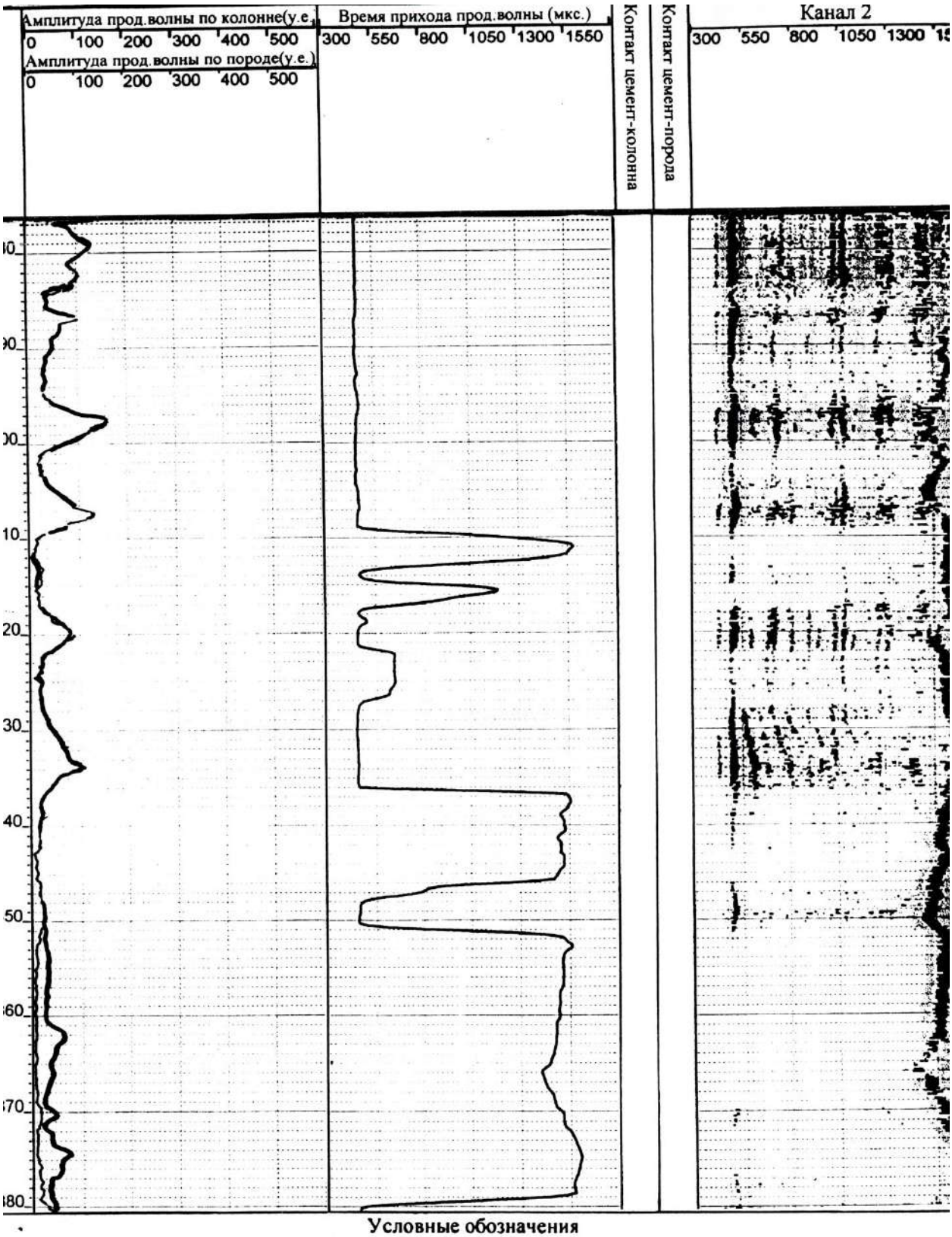
Колонна



Условные обозначения

Колонна

Отсутствует | Плохой | Сплошной | Частичный | Неопределенный



Условные обозначения

Колонна

Отсутствует | Плохой | Сплошной | Частичный | Неопределенный

Порода

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ШИРОКОПОЛОСНОЙ МОДИФИКАЦИИ АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА [6, 9, 13]

В широкополосной модификации акустического метода (АКШ) предусмотрено использование более широкого диапазона частот (1–22 кГц) импульсов, генерируемых излучателями. Это

Таблица 29

Характеристика аппаратуры АКШ, используемой в настоящее время

Прибор	Число монопольных излучателей	Число приемников
АКМ-200	2	16
АКМ-60	2	7
АКМБ	2	11
АКД-8	1	8
МАК	1	16

позволяет повысить в 2–3 раза (при использовании низких частот 4–10 кГц) глубинность метода и обеспечивает изучение разрезов обсаженных скважин при условии качественного цементирования колонны. Главное преимущество АКШ – возможность получения значительно большего объема информации, чем при стандартных акустических исследованиях.

Широкополосные приборы имеют гораздо большее число приемников, чем узкополосные. В табл. 29 приведены современная отечественная аппаратура АКШ и ее характеристики.

Отечественный прибор с дипольными преобразователями – АВАК-7. Он имеет два монопольных излучателя с различными частотами (20, 12, 8 и 2,5 кГц) и два приемника. Прибор позволяет регистрировать *P*-волну на высоких частотах, *S*-волну на частоте 8 кГц дипольным зондом, волну Лэмба на частоте 2,5 кГц.

Аппаратура ВАК-8 имеет монопольные и дипольные излучатели и приемники. Частота регулируется и изменяется в диапазоне 2,5–22 кГц.

Фирма «Baker Atlas» разработала аппаратуру ХМАС, которая является наиболее совершенным типом современных акустических приборов. С ее помощью можно регистрировать все типы волн и, кроме того, изучать азимутальную анизотропию свойств исследуемых пород.

При исследованиях методом АКШ получают: а) фазокорреляционную диаграмму (ФКД); б) аналоговые кривые кинематических (ΔT_P, ΔT_S и ΔT_L – интервальное время волны Лэмба*)) и динамических (α_P, α_S и α_L – коэффициент поглощения волны Лэмба) параметров упругой волны (рис. 86); в) видеоизображение волновой картины, фиксируемое кинорегистратором в отдельных

*)Волна Лэмба распространяется по столбу бурового раствора, имеет длину волны порядка диаметра скважины, характеризуется более низкой частотой колебаний и скоростью, чем волна *S*. При отсутствии влияния трещиноватости обычно $A_L > A_S > A_P$.

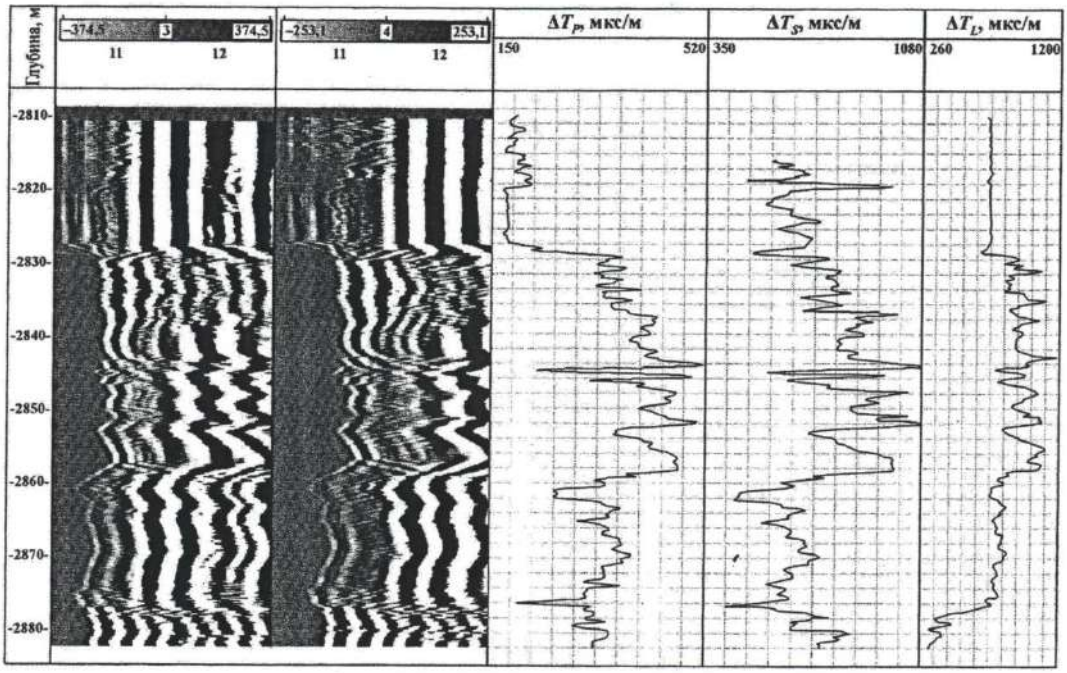


Рис. 86. Пример фазокорреляционной диаграммы (ФКД) и аналоговых кривых ΔT, полученных при исследовании скважины методом АКШ (по В.Н. Черноглазову)

точках разреза, задаваемых оператором. Аналоговые кривые получают путем обработки на ЭВМ по специальным программам данных ФКД. Специальные программы дают возможность с помощью ЭВМ получить непрерывные кривые значений коэффициентов Пуассона $\sigma_п$ и сжимаемости $\beta_п$ породы, которые при необходимости для отдельных пластов можно рассчитать по формулам

$$\sigma_п = [0{,}5(\Delta T_S/\Delta T_P)^2 - 1]/[(\Delta T_S/\Delta T_P)^2 - 1]; \quad (81)$$

$$\beta_п = [3(1-\sigma_п)\Delta T_P^2]/[\delta_п(1+\sigma_п)] \quad (82)$$

или $$\Delta T_P = \sqrt{(\beta_п\delta_п(1+\sigma_п))/(3(1-\sigma_п))}. \quad (83)$$

По данным АКШ решаются следующие задачи.

1. Литологическое расчленение разреза – более детальное, чем по материалам стандартного акустического метода.

2. Выделение в разрезе участков, представленных трещинными и кавернозно-трещинными коллекторами с использованием характерного для каждой разновидности «звукового образа» на волновой картине, и прежде всего в участках разреза с интенсивным увеличением ΔT_L, а также ослаблением амплитуд волн S и P – α_S, α_P (рис. X).

3. Расчет величин коэффициента трещиноватости $k_{п.т}$ в интервалах трещинных и порово-трещинных коллекторов и коэффициента кавернозной пористости $k_{п.к}$ в интервалах порово-кавернозных коллекторов.

4. Получение информации об упругих свойствах разреза (акустическая жесткость, коэффициент Пуассона, модуль Юнга и др.), которая используется в комплексе с детальной сейсморазведкой, ВСП, данными наклономера и акустического телевизора для построения трехмерной модели изучаемого месторождения.

5. Выявление характера насыщения коллекторов в обсаженной скважине с хорошим качеством цементирования по диаграммам АКШ, полученным после полного расформирования зоны проникновения в коллекторах, по комплексу динамических и кинематических параметров волн P и S.

6. Количественная оценка коэффициентов нефтегазонасыщенности в обсаженной колонной скважине.

Определение типа емкости и количественные оценки коэффициентов $k_{п.т}$ и $k_{п.к}$ выполняются по методике В.М. Добрынина [9] с использованием величины коэффициента сжимаемости породы $\beta_п$:

$$\beta_{п} = \beta_{тв} + k_{п}\,\beta_{пор}/(1 + \beta_{пор}/(\beta_{ж} - \beta_{тв})), \qquad (84)$$

где $k_{п}$ – коэффициент общей пористости породы; $\beta_{тв}$, $\beta_{ж}$ и $\beta_{пор}$ – соответственно коэффициенты сжимаемости твердой части породы, жидкости, заполняющей емкостное пространство, и пор породы. Коэффициенты сжимаемости твердой фазы для доломитов, известняков и песчаников равны соответственно $1{,}16\cdot10^{-5}$, $1{,}34\cdot10^{-5}$ и $2{,}5\cdot10^{-5}$ МПа$^{-1}$. Коэффициенты сжимаемости воды и нефти определяются в лаборатории. Для водных растворов NaCl сжимаемость определяется в зависимости от минерализации воды $C_{в}$, пластовых температуры t и давления p (рис. 87).

Величина $\beta_{пор}$ складывается из компонентов емкостного пространства:

$$\beta_{пор} = (k_{п.т}/k_{п})\beta_{т} + (k_{п.к}/k_{п})\beta_{к} + (k_{п.мз}/k_{п})\beta_{п.мз}, \qquad (85)$$

где $\beta_{т}$, $\beta_{к}$ и $\beta_{п.мз}$ – соответственно коэффициенты сжимаемости трещин, каверн и межзерновых пор, которые определяют экспериментально или рассчитывают теоретически для конкретной модели породы. Коэффициенты сжимаемости межзерновых пор доломитов, известняков и песчаников равны соответственно $10\cdot10^{-5}$, $15\cdot10^{-5}$ и $20\cdot10^{-5}$ МПа$^{-1}$.

Поскольку $\beta_{т} \gg \beta_{п.мз}$, для порово-трещинного типа коллектора

$$\beta_{п.т} \approx (k_{п.т}/k_{п})\beta_{т} + \beta_{п.мз}. \qquad (86)$$

Коэффициент сжимаемости трещин можно определить по формуле

$$\beta_{т} = (25\div135)\cdot10^{-3}/(p - p_{пл}), \qquad (87)$$

где p и $p_{пл}$ – соответственно среднее нормальное напряжение и пластовое давление. Значения коэффициента сжимаемости трещин достигают $100\cdot10^{-5}$ МПа$^{-1}$ и более.

Коэффициент сжимаемости для порово-кавернозного коллектора определяется по формуле

$$\beta_{п.кав} = 15\cdot10^{-5} - 11\cdot10^{-5}(k_{п.к}/k_{п}). \qquad (88)$$

Для низкопоровых карбонатных коллекторов $\beta_{п.кав} \approx \approx 4\cdot10^{-5}$ МПа$^{-1}$.

Таким образом $\beta_{т} \gg \beta_{п.мз} > \beta_{п.кав}$.

Определив значения величин, входящих в формулы (84–88) для разных случаев – порово-трещинного, межзернового и порово-кавернозного коллектора, и подставив их в формулу (83), получают массив данных для построения палеток $\Delta T_{P} = f(k_{п.т}/k_{п}, k_{п})$ и $\Delta T_{P} = f(k_{п.к}/k_{п}, k_{п})$ для пород определенного состава скелета.

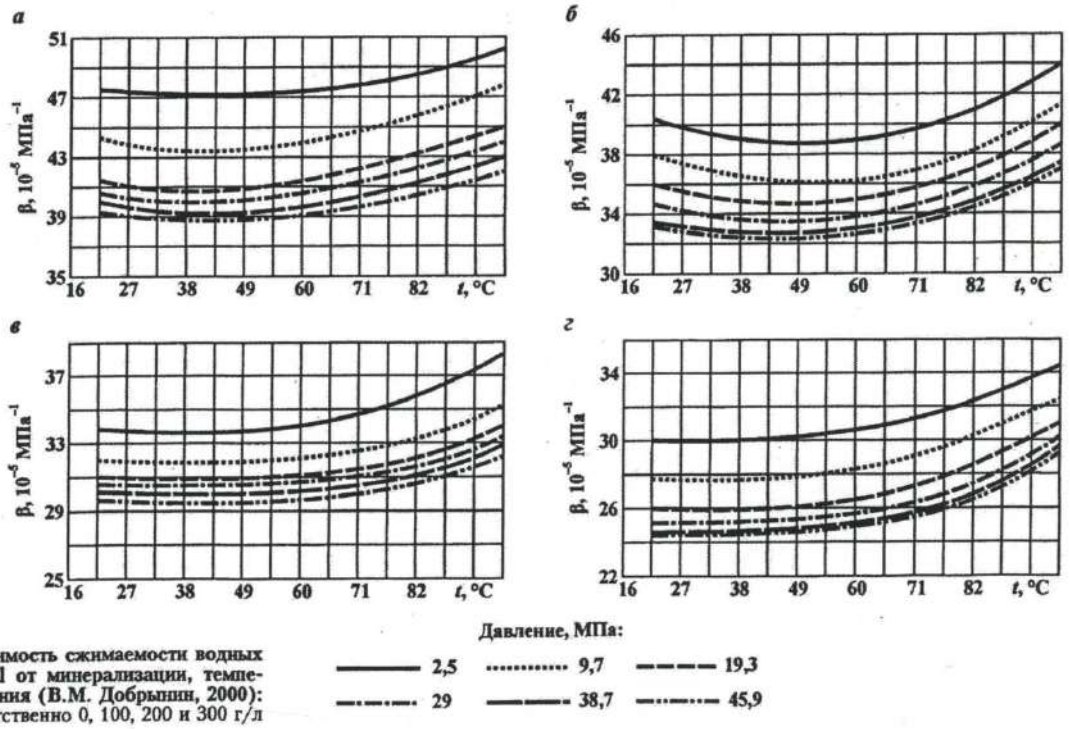


Рис. 87. Зависимость сжимаемости водных растворов NaCl от минерализации, температуры и давления (В.М. Добрынин, 2000):
а–г – $C_в$ соответственно 0, 100, 200 и 300 г/л

На рис. 88 приведен пример расчетной палетки для известняка и доломита. Этой палеткой можно пользоваться при решении обратной задачи для определения типа структуры емкостного пространства и количественных оценок $k_{п.т}$ и $k_{п.к}$.

Пример 50. Выделить трещиноватые участки разреза по материалам АКШ и определить в зонах развития трещин коэффициент трещиноватости $k_{п.т}$ (рис. 89).

В интервале 2355–2378 м выделяем зоны трещиноватости по признаку резкого увеличения коэффициентов поглощения α_S, α_L

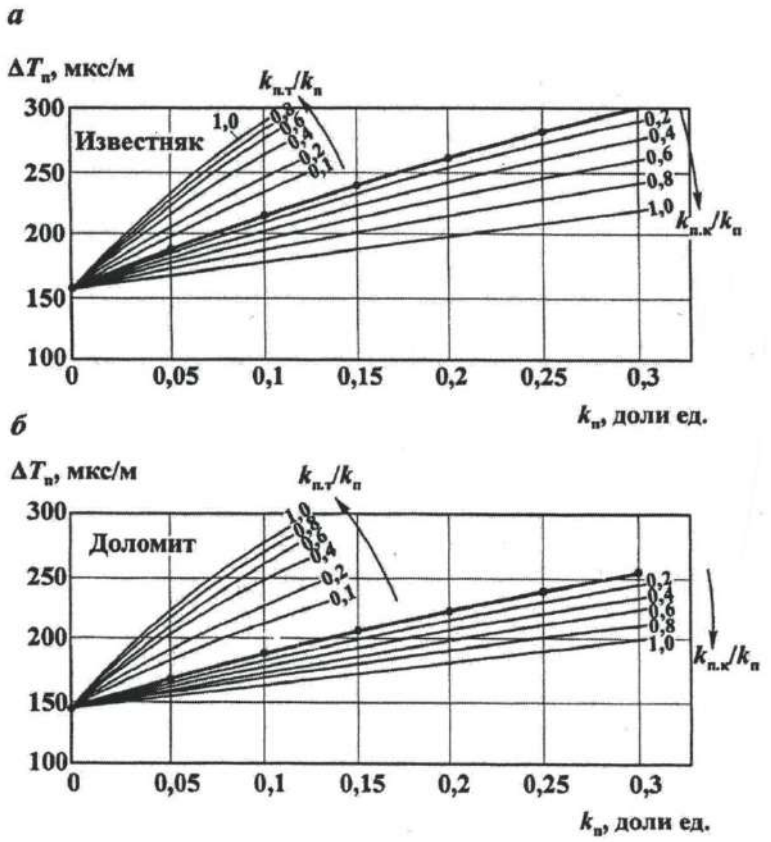


Рис. 88. Палетки для определения типа структуры емкостного пространства и коэффициентов трещинной и каверновой пористости по данным АК для известняка (*а*) и доломита (*б*) при насыщении емкостного пространства фильтратом ПЖ

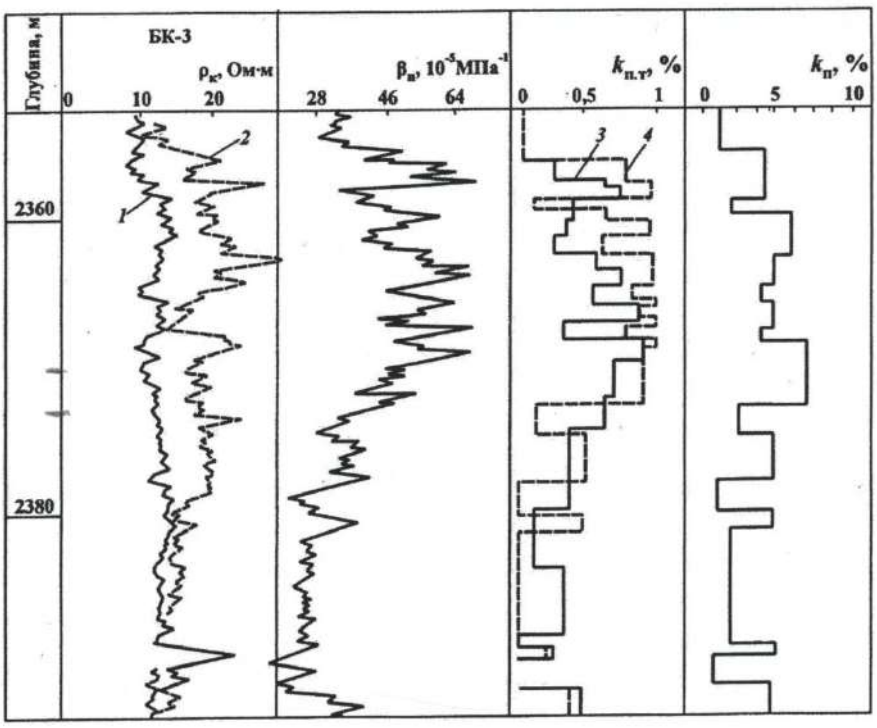


Рис. 89. Определение $k_{п.т}$ по данным АКШ в порово-трещинном коллекторе (карбонатный разрез).
Кривые $\rho_к$: *1* – $\rho_р$ = 0,5 Ом·м, *2* – $\rho_р$ = 2,4 Ом·м; графики $k_{п.т}$, построенные по данным методов: *3* – двух растворов, *4* – АКШ (по В.А. Костериной)

(на рисунке эти кривые не приведены). В указанном интервале, представленном известняком, выбираем участок 2370–2373 м, в котором коэффициент сжимаемости $\beta_{п.т}$ по кривой этого параметра равен $46 \cdot 10^{-5}$ МПа$^{-1}$. Коэффициент трещинной пористости оценим с помощью формулы (86) или

$$k_{п.т} = k_п(\beta_{п.т} - \beta_{п.мз})/\beta_т. \qquad (89)$$

Значение $\beta_{п.мз}$ принимаем равным $15 \cdot 10^{-5}$ МПа$^{-1}$ для известняка, значения коэффициента общей пористости $k_п = 6$ % – в соответствии с результатами определения этого параметра, указанными на рис. 89. Принимая сжимаемость трещин $\beta_т = 260 \cdot 10^{-5}$ МПа$^{-1}$ и подставляя значения $\beta_{п.т}$, $\beta_{п.мз}$, $\beta_т$ и $k_п$ в формулу (89), находим $k_{п.т} = 0{,}8$ %.

Кинематические и динамические характеристики волны Лэмба, полученные на низких частотах упругих колебаний, позволяют выделять в разрезе проницаемые зоны коллекторов. В этом случае снижение скорости распространения и интенсивное затухание волны Лэмба обусловлено гидродинамическими свойствами коллектора – фильтрацией жидкости из скважины в пласт под действием упругой волны или, при наличии глинистой корки, передачей упругих колебаний через нее в пласт, что обеспечивает движение жидкости в пласте. С целью выделения зон с повышенными фильтрационными свойствами в глинистых породах целесообразно выполнять нормализацию показаний ΔT_L и ГМ. Превышение значений ΔT_L над нормализованными значениями ГМ позволяют выделить эти интервалы.

Задачи

94. Выделить зоны карбонатных коллекторов с высокими фильтрационно-емкостными свойствами по аномальным показаниям кривой ΔT_L в комплексе с показаниями других методов ГИС (НГМ, ГМ, АМ, БМ, ИМ, СП и каверномер) в разрезе скважины, вскрывшей породы ассельско-сакмарского возраста одного из месторождений Тимано-Печорской НГП (рис. XI). Коллекторы относятся к межзерновому типу.

Использование дипольного зонда аппаратуры ХМАС позволяет исследовать азимутальную анизотропию пород, которая может быть обусловлена трещиноватостью или напряженным состоянием пород. Возможность выделения этих зон основана на эффекте расщепления поперечной волны на две составляющие – низко- и высокоскоростную компоненты, которые распространяются в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Быстрая компонента, на которую приходится основная часть энергии волны, распространяется параллельно направлению преобладающей системы трещин. Менее интенсивная медленная компонента распространяется перпендикулярно направлению трещин. Аппаратура позволяет рассчитать коэффициент азимутальной анизотропии и выделить аномальные зоны, обусловленные наличием трещин, а также оценить азимут простирания трещинных систем (рис. XII).

95. Выделить зоны развития трещин по данным дипольного зонда (аппаратура ХМАС) на основании аномалий коэффициента азимутальной анизотропии (см. рис. XII).

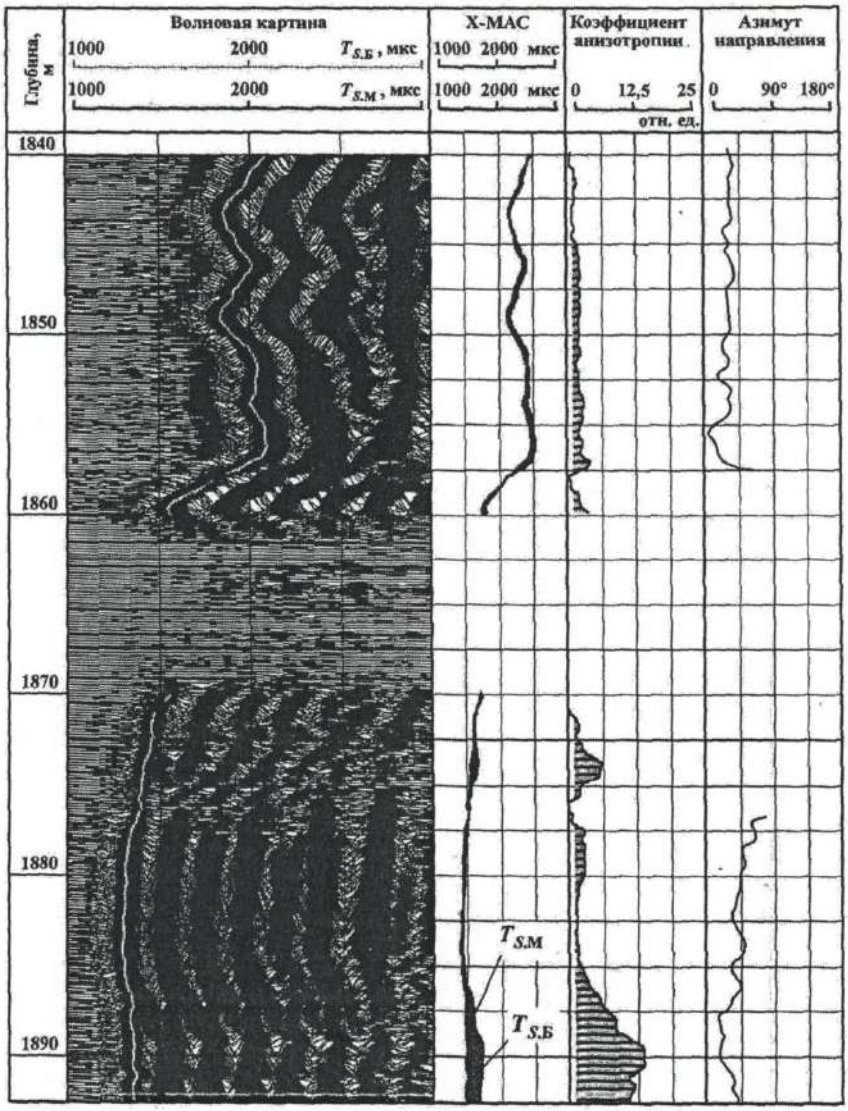
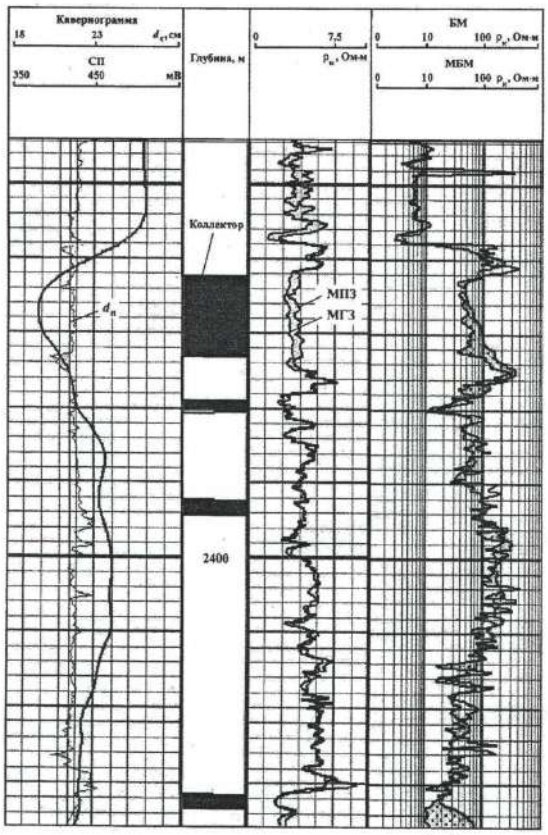


Рис. XII. Выделение зон трещиноватости, определение азимута направления трещин и коэффициента анизотропии по быстрой и медленной компонентам поперечной волны.

Аппаратура ХМАС; по материалам В.М. Кузнецова (ВНИИИгеофизика), В.И. Рыжкова (ИПНГ) и компании «Шлюмберже»

Рис. XIII. Комплекс методов ГИС, включающий диаграммы ядерно-магнитного метода в варианте ССП, в терригенном разрезе покурской свиты одного из месторождений Вартовского свода



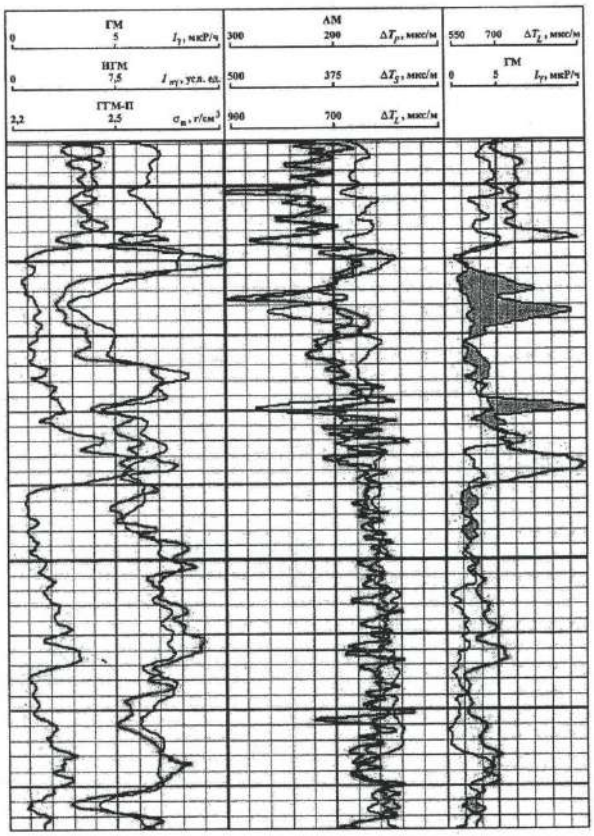


Рис. XI. Комплекс методов ГИС по участку карбонатного разреза ассельско-сакмарского возраста одного из нефтяных месторождений Тимано-Печорской НГП:
$d_п$ = 216 мм, $\rho_с$ = 1,1 Ом·м в пластовых условиях

Работа № 5

Интерпретация результатов метода вертикального сейсмического профилирования (ВСП)

Вертикальное сейсмическое профилирование заключается в изучении с помощью сейсмоприемников, установленных в скважине, полей упругих волн, созданных приповерхностным источником.

С помощью метода ВСП возможно литологическое расчленение разрезов скважин, определение пластовых скоростей упругих волн и изучение геометрии границ раздела сред с разными акустическими свойствами в околоскважинном пространстве или ниже забоя скважины.

Изменения физических свойств пород, связанные с проходкой скважины, наличие в ней бурового раствора или обсадных труб не оказывает влияния на результаты ВСП.

Метод ВСП может осуществляться в различных модификациях, различающихся по частотам волнового поля или по взаимному расположению источников и приемников упругих колебаний.

Для возбуждения упругих колебаний в горных породах применяют источники как взрывного так и невзрывного типов. В качестве приемников используют сейсмоприемники электродинамического или пьезоэлектрического типов, которые прижимают к стенке скважины.

Современная аппаратура ВСП позволяет размещать в скважинах до 12 сейсмоприемников.

Расстояние от пункта взрыва до устья скважины, в которой установлены сейсмоприемники, обычно невелико по сравнению с глубиной скважины и составляет от 50 до 200 м. Один и тот же вертикальный профиль (т. е. скважина) может быть отработан при серии взрывов, расположенных на разных расстояниях от устья скважины и под разными азимутами от нее.

Как показано на рис.1, к приемникам, расположенным в скважине, приходят и прямые и отраженные волны. По направлению прихода волны к приемникам они подразделяются на падающие (прямые) и восходящие (отраженные). К приемнику, расположенному на отражающей границе, пересеченной скважиной, падающая и восходящая волна приходят одновременно.

На рис. 2 изображены волновые картины и оси синфазности колебаний, зарегистрированных приемниками при схеме наблюдений, приведенной на рис. 1. Ось синфазности OABC по существу представляет собой годограф прямой (падающей) волны.

Оси синфазности AO', BA'O'', CB'A''O''' – годографы волн, отраженных соответственно от I, II и III отражающих границ.

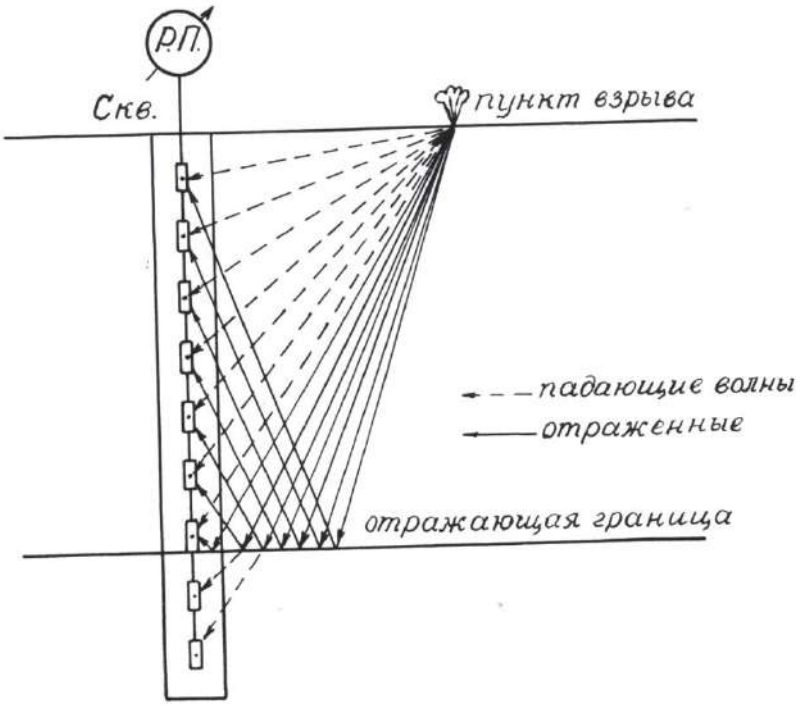


Рис. 1. Типовая схема наблюдений в ВСП.

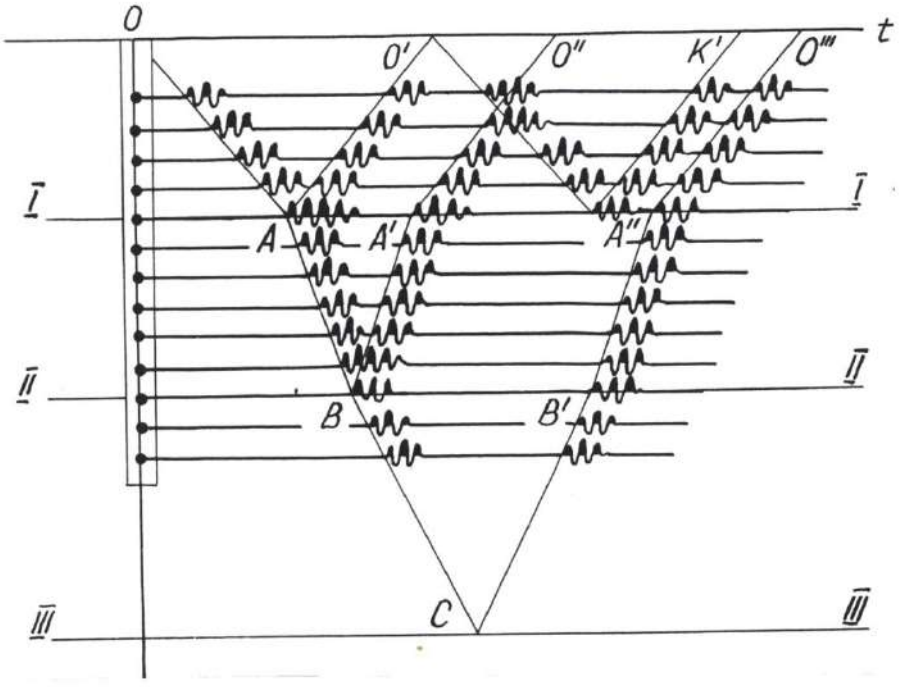


Рис. 2. Сейсмограммы прямых и отраженных волн при типовой схеме наблюдений ВСП.

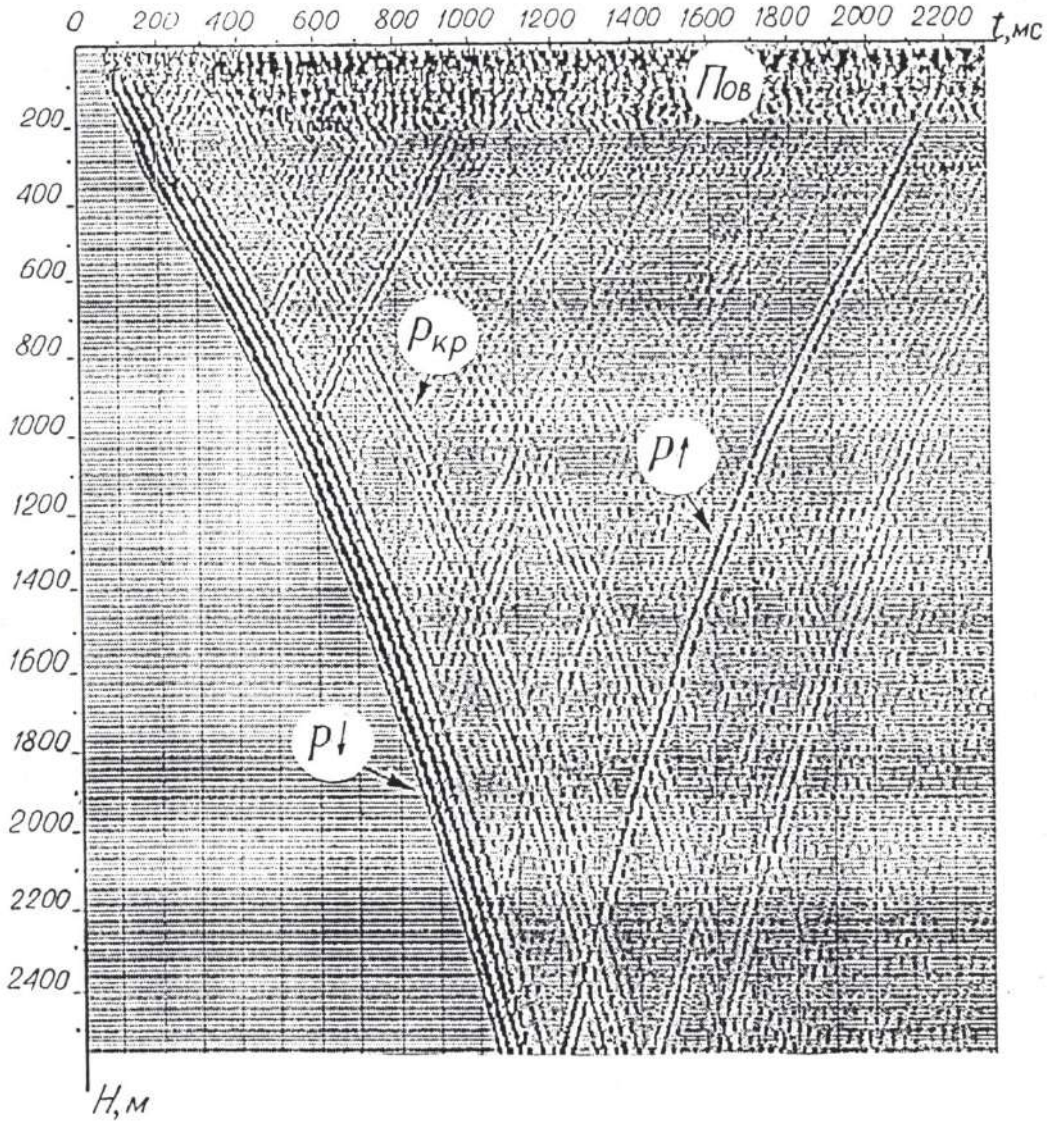


Рис. 3. Сейсмический разрез ВСП. Расстояние ПВ от устья скважины – 95 м.

Р↓ – падающая волна; Р↑ – восходящая (отраженная волна);

$П_{ОВ}$ – поверхностная волна. (По материалам А. А. Чернова, 2006)

Точки пересечения осей синфазности прямых и отраженных волн определяют положение отражающих границ. Таким образом могут быть выявлены и границы, располагающиеся ниже забоя скважины (граница III).

Пересечения типа О'К-КК' соответствуют волнам-помехам, т. е. «кратным волнам», претерпевшим отражение от ближайшей к поверхности границы раздела и от самой поверхности Земли.

Результаты обработки данных ВСП позволяют определить скоростную характеристику разреза.

Скорость упругих волн в среде может быть рассчитана по годографу падающей волны.

Средняя скорость от поверхности Земли до заданной глубины H равна:

$$V_{\text{ср}} = \frac{\sqrt{H^2+l^2}}{t}, \qquad (1)$$

где t – время пробега волны до заданной глубины H,

l – расстояние источника упругих волн от устья скважины.

Скорость, определяемая по разности времен Δt пробега волны между двумя соседними точками, расположенными на расстоянии ΔH одна от другой, называется интервальной скоростью

$$V_{\text{инт.}} = \frac{\Delta H}{\Delta t}. \qquad (2)$$

Задание

1. Внимательно изучите выданные Вам материалы.
2. По пересечениям осей-синфазности прямых и отраженных волн определите положение отражающих границ.
3. Разбейте годограф падающей волны на участки с одинаковым углом наклона.
4. По формуле (2) рассчитайте интервальную скорость для этих участков разреза.

Составил – И. Г. Сковородников

Раб. N5, вар. I, II, III.

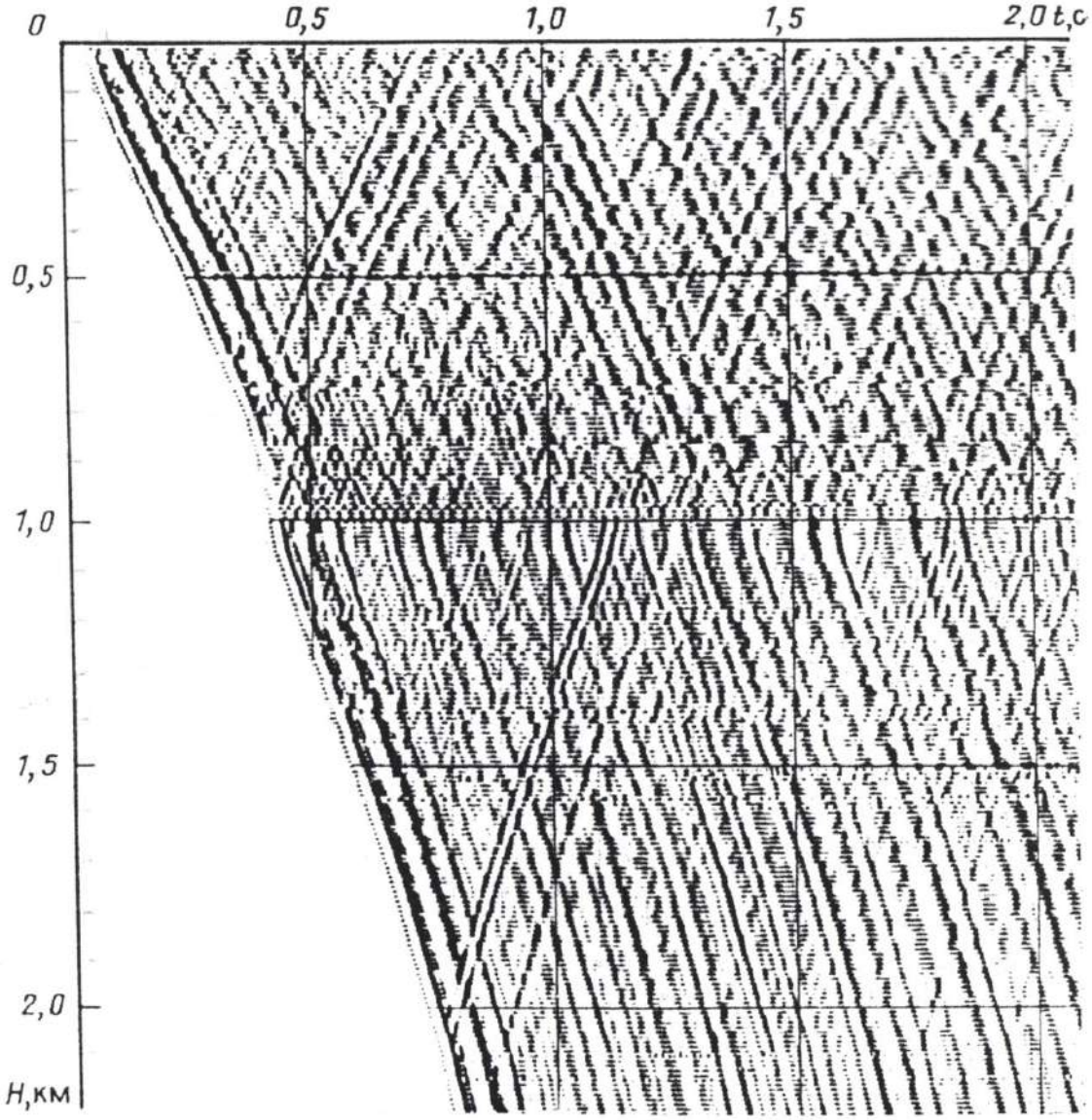


Рис. Сейсмограмма ВСП

$\ell_{пв-скв} = 60$ м

ЗАДАНИЕ

(для всех вариантов)

Работа № 6

Интерпретация результатов межскважинного акустического прозвучивания

Метод акустического прозвучивания (МАП) заключается в возбуждении упругих колебаний источником, находящимся в одной скважине, и регистрации этих колебаний в другой скважине. При наличии в межскважинном пространстве акустических неоднородностей, с худшими, чем у вмещающих пород упругими свойствами, позади препятствия наблюдается зона акустической тени, в пределах которой уменьшается амплитуда упругих волн и увеличивается время их прихода.

Такими «препятствиями» могут быть, например, карстовые полости в известняках, тела пегматитов в гранитах и некоторые другие геологические образования.

Импульс упругих колебаний в методе МАП возбуждается посредством электрогидравлического удара, который возникает при взрыве металлической проволочки в скважинной жидкости, когда на эту проволочку падают мощный импульс электрического тока.

Упругие колебания, распространившиеся через скважинную жидкость в горные породы, улавливаются в другой скважине с помощью приемника электродинамического типа.

Поскольку размер излучателя очень мал, то на расстоянии $r>\lambda$ от излучателя фронт волны может быть принят за плоский (λ – длина волны).

Работы могут проводится либо синхронным способом при одновременном и одинаковом изменении глубины и излучателя и приемника, либо веерным способом (аналог шагового способа в методе РВП).

При веерном способе рекомендуется приемник оставлять на одном месте, а излучатель перемещать по скважине и останавливать через каждые 10 м.

В местах резкого изменения волновой картины шаг может быть уменьшен до 5 или 1 м.

Предельная дальность акустического прозвучивания (просвечивания) – 150 м.

Первичная обработка материалов МАП заключается в вычислении средних скоростей проходящих волн по лучам просвечивания и определения их амплитуды или коэффициентов их поглощения.

Местоположение аномальных объектов определяется методом засечек, аналогично тому, как это делается в методе РВП.

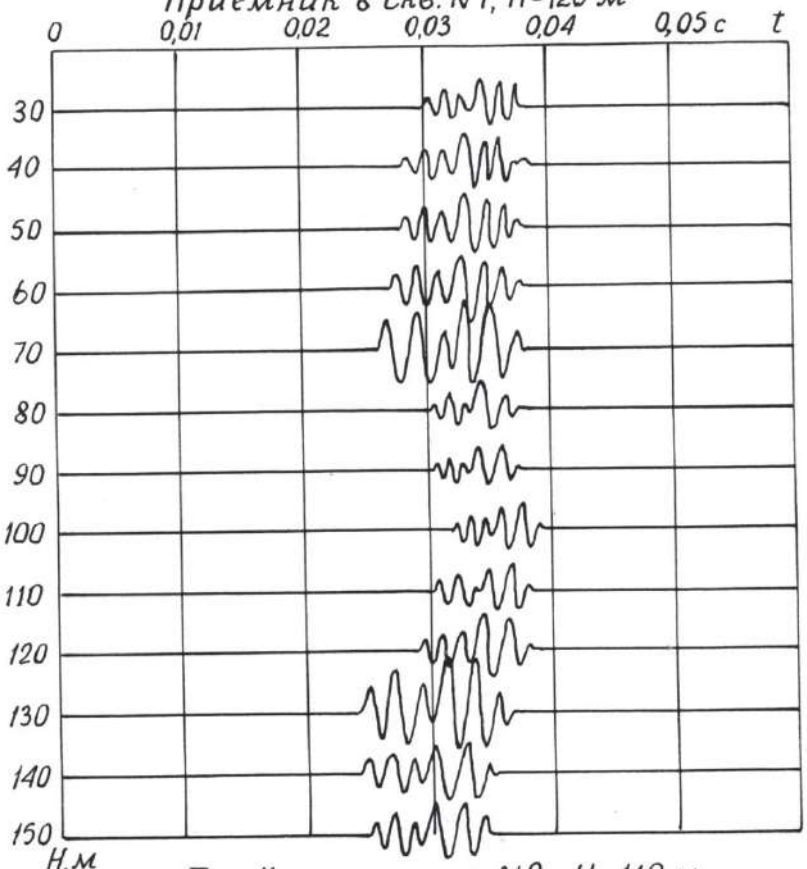
ЗАДАНИЕ

1. По выданному геологическому разрезу определить длину r лучей просвечивания для каждой точки стояния приемника. Занести это данные в таблицу.
2. Рассчитать среднюю скорость упругих волн по формуле $V_{ср}=\frac{r}{t}$. Занести в таблицу.
3. По сейсмограммам определить амплитуду продольной волны A_p.
4. Построить графики $V_{ср}$ и A_p и по ним выделить аномальные зоны.
5. Провести «засечки» и определить местонахождение аномального объекта в плоскости геологического разреза.
6. Написать отчет.

Составил: И. Г. Сковородников

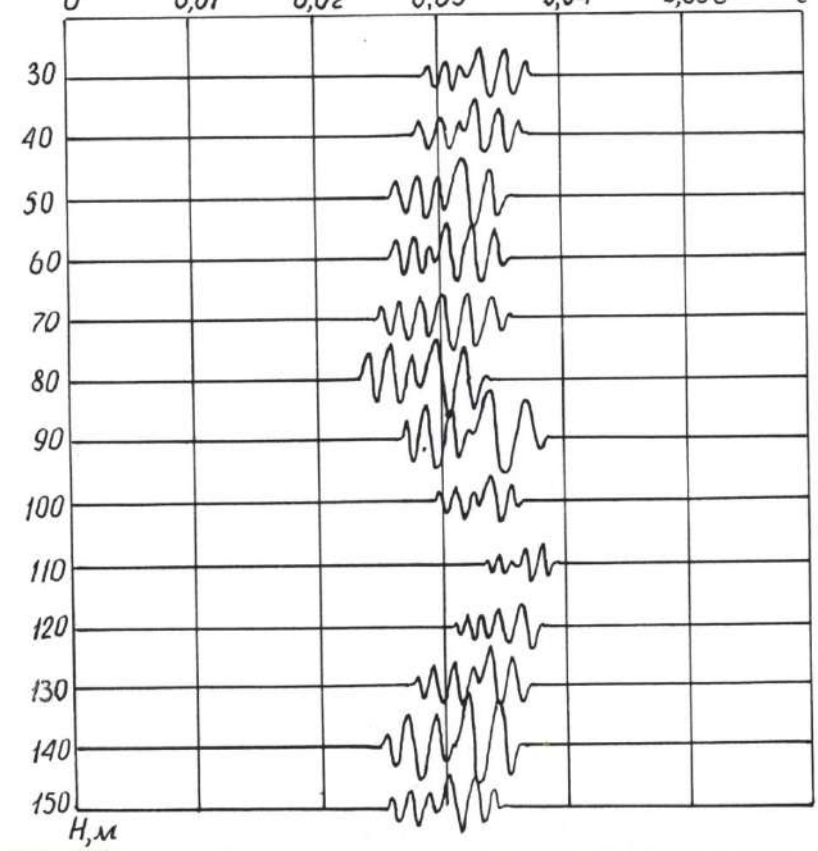
Вар. I, раб. №6

Приёмник в скв. N1, H=120 м



r, м	$V_{ср}, \frac{км}{с}$	$A_р$, мВ

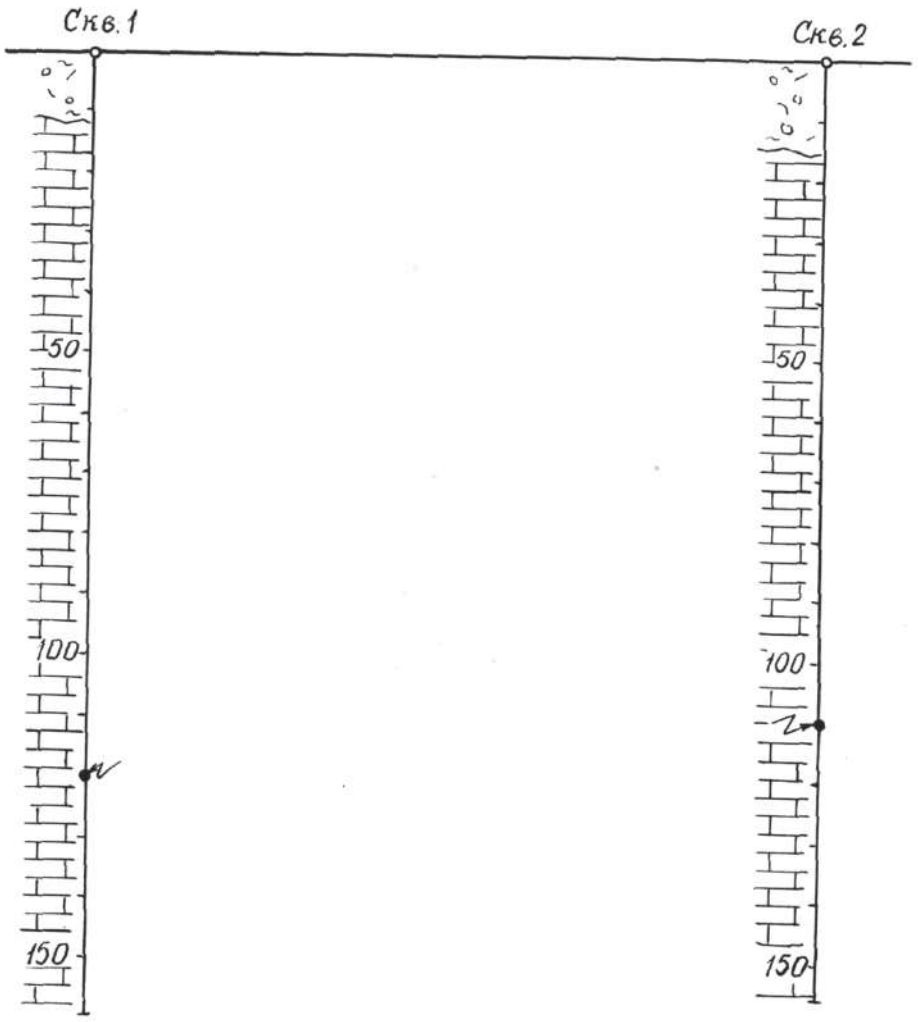
Приёмник в скв. N2, H=110 м



r, м	$V_{ср}, \frac{км}{с}$	$A_р$, мВ

Вар. I, раб. № 6

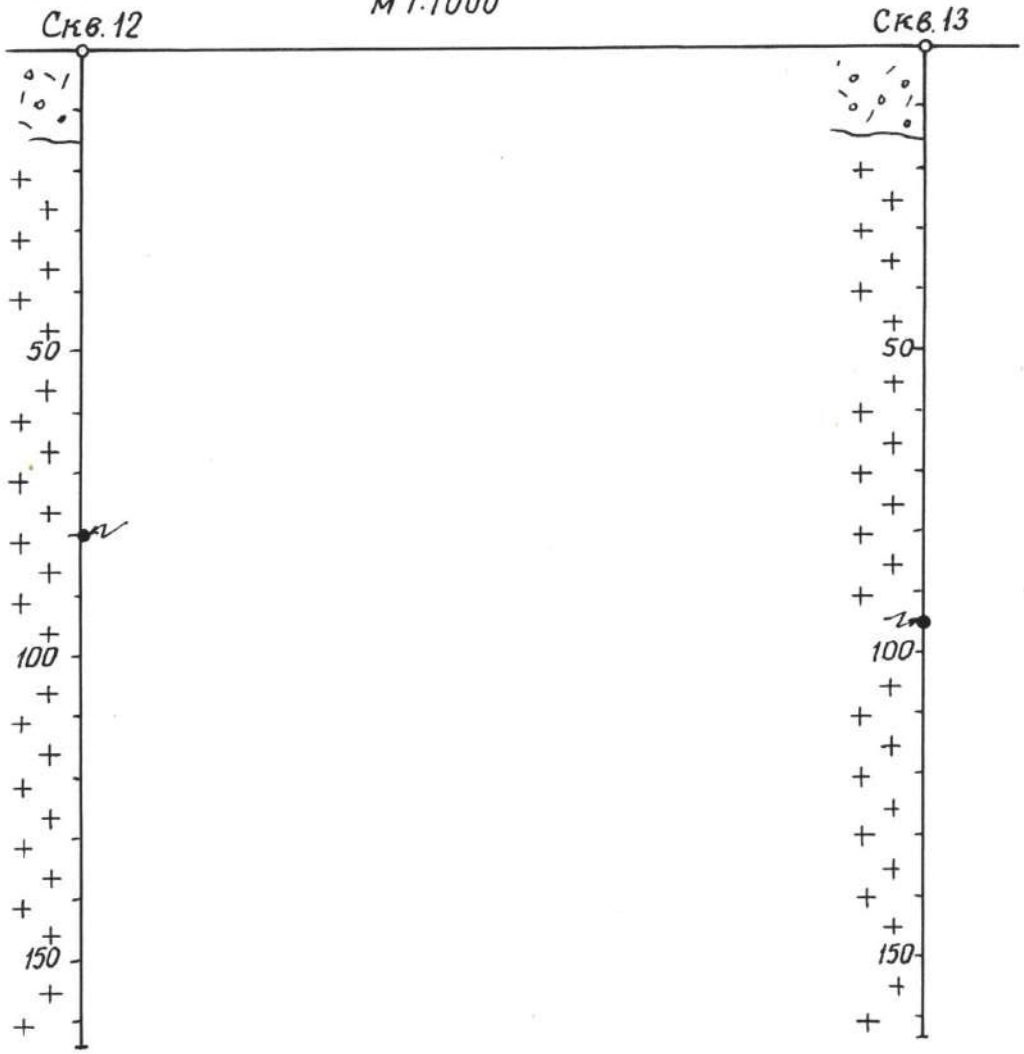
М 1:1000



Вар. II., раб. №6

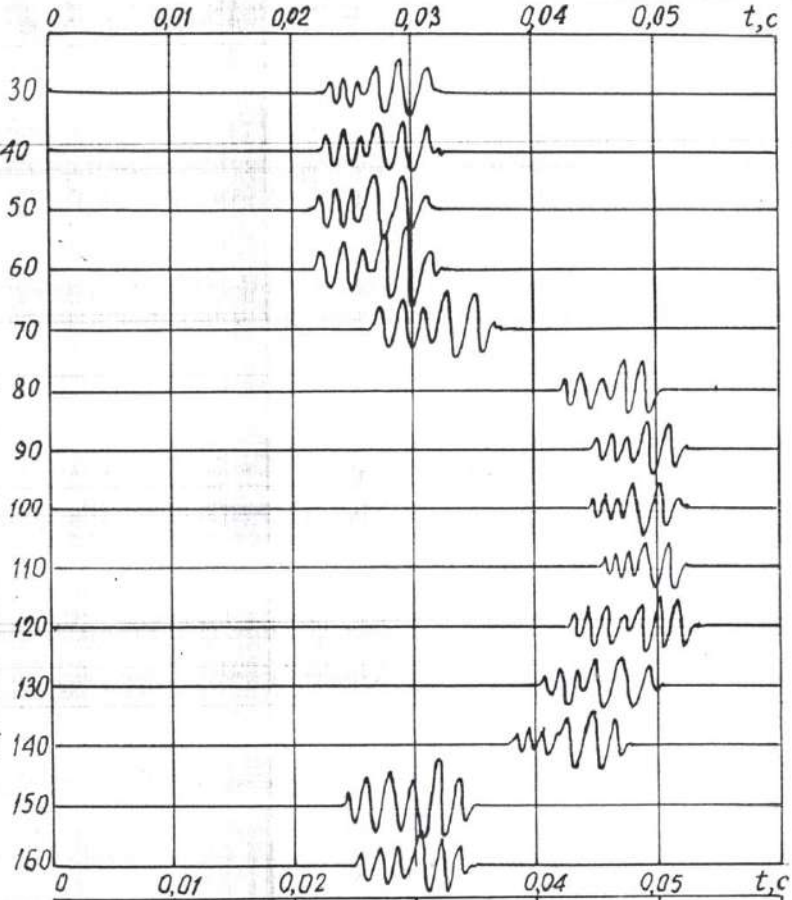
Студент _____

М 1:1000



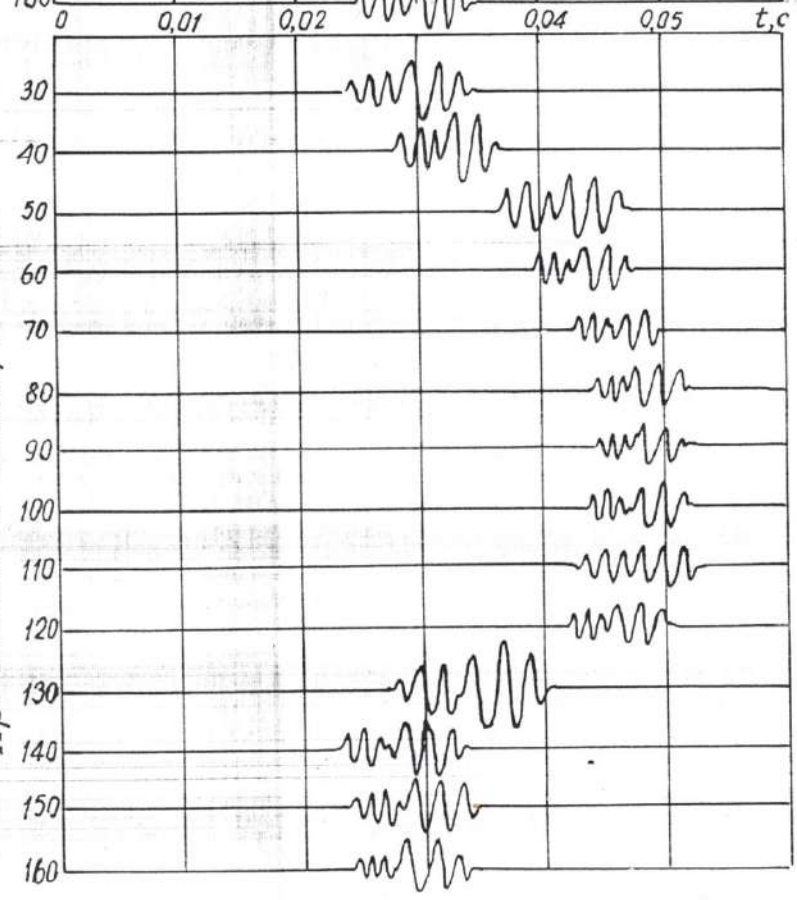
Вар. II, раб. №6

Приемник в скв. 12; H=80м



r, м	$V_{кр}$, км/с	A_p, мв

Приемник в скв. 13; H = 95м



r, м	$V_{кр}$, км/с	A_p, мв

Р А Б О Т А №

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДИАГРАММ ИНДУКЦИОННОГО КАРОТАЖА

Индукционный каротаж изначально был предназначен для электрических исследований в сухих скважинах или скважинах, бурящихся на непроводящих (нефтяных) растворах / /. Может применяться в случае обсадки скважин асбоцементными или пластмассовыми трубами. Особенно хорошие результаты дает при изучении пластов низкого сопротивления от 0 до 50 ом.м.

Прибор индукционного каротажа (рис.1) состоит из генераторной 1 и приемной 2 катушки. Расстояние между ними называется длиной зонда l . Через генераторную катушку пропускается переменный ток от РС –генератора 3 с частотой 10÷200 кгц. Переменное магнитное поле этого тока индуцирует вихревые токи в породах, окружающих скважинный снаряд. Магнитное поле вихревых токов, в свою очередь, индуцирует в приемной катушке Э.Д.С., которая поступает на усилитель 4. Если ток генератора имеет постоянную частоту и силу, то ЭДС в приемной катушке прямопропорциональна взаимной индукции катушек, т.е. длине зонда и электропроводимости среды σ :

$$e = c \cdot \sigma$$

и, следовательно, обратно пропорциональна электрическому сопротивлению ρ. (c – постоянная, зависящая от конструкции зонда).

Перед спуском в скважину снаряд настраивается с помощью дополнительной компенсационной катушки так, чтобы отсчет в воздухе был равен 0. Поскольку регистрируемый сигнал в индукционном каротаже пропорционален кажущейся проводимости, то масштаб проводимостей на диаграммах получается линейным, а масштаб сопротивлений – гиперболическим , растянутым в области низких сопротивлений и сжатым в области высоких. Эта особенность диаграммы обеспечивает хорошую дифференциацию разреза с удельными электрическими сопротивлениями только до 50 Ом·м.

Область исследования индукционного зонда в радиальном и вертикальном направлениях характеризуется графиками соответствующих геометрических (или пространственных) факторов /Долль/.

На рис.2 представлен график радиального геометрического фактора q_r двухкатушечного зонда. Этот график показывает относительное влияние на сигнал тонких цилиндрических слоев различного радиуса. Из графика видно, что при равном сопротивлении наибольшее влияние имеют слои, находящиеся на расстоянии $r = 0{,}5L$, наименьшее - в бесконечности ($r \gg L$) и вблизи снаряда ($r \ll L$). При различной электропроводности вклад каждого слоя в общий сигнал пропорционален произведению его геометрического фактора на электропроводность. Так, например, если на рис.2 среда А - буровой раствор скважины, В - зона проникновения и С - неизмененная часть пласта, то суммарный геометрический фактор каждой из этих сред будет соответствовать площади а, в или с на радиальной характеристике.

Вклад каждой из этих зон в суммарный сигнал будет определяться произведением проводимости среды на её суммарный геометрический фактор.

Таким образом, график радиального геометрического фактора удобен для оценки влияния скважины и зоны проникновения на результаты измерений.

На рис.3 представлен график вертикального геометрического фактора q_z, который характеризует относительное влияние на сигнал горизонтальных слоев, против которых располагается прибор. При равном сопротивлении наибольший вклад в общий сигнал дают слои, расположенные напротив середины снаряда, с удалением слоев от центра снаряда их влияние медленно убывает.

Как показывает рис.3, слой конечной мощности Д между бесконечными E и f будет иметь суммарный геометрический фактор q_z, соответствующий площади "α"; а слои E и f - соответственно площадям "e" и "f" на графике вертикальной характеристики. График вертикального геометрического фактора является основой для оценки влияния вмещающих пород.

На практике в зонды индукционного каротажа 5Ф1,2; 6Ф1 и др., кроме двух основных катушек, вводятся несколько дополнительных генераторных катушек, называемых фокусирующими.

Эти катушки вместе с основной приемной образуют вспомогательные зонды меньшей длины. Т.к. фокусирующие катушки включены навстречу основной, с их помощью удается скомпенсировать влияние цилиндрической зоны, расположенной в радиусе от 0 до 50-100 см. Основное влияние на измеряемый сигнал в много - катушечном зонде оказывает зона радиусом от 0,5 ÷ 1 до 1,5 м.

На рис.4 показаны графики радиального геометрического фактора многокатушечных зондов.

Таким образом, в индукционном каротаже удается почти полностью избавиться от влияния скважины и зоны проникновения, особенно при сопротивлении бурового раствора более 1 Ом·м и повышающем проникновении его в пласт.

Скважина практически не влияет на результаты измерений при $d < 0,4$ м /Латышова М.Г./. При диаметре $d > 0,4$ м влияние скважины может быть определено по показаниям против плотных, высокоомных пород.

Кривая индукционного каротажа против таких пластов должна доходить до нулевой линии ($\rho = \infty$; $\sigma = 0$). Поправка за влияние скважины может быть введена непосредственно на диаграмные путем соответствующего смещения нулевой линии /Плюснин/.

Зона проникновения при неглубоком ($2 \div 4d$) проникновении не вносит искажений в результаты измерений. В случае глубокого, и особенно понижающего проникновения, удельное сопротивление пород может быть найдено только при интерпретации комплексных электрических измерений.

Вмещающие породы в индукционном каротаже влияют на результаты измерений значительно меньше, чем в методе ПС, а для пластов мощностью более 2-4 м (в зависимости от марки зонда) этим влиянием можно пренебречь.

Для тонких пластов на основании вертикального геометрического фактора рассчитаны палетки учета влияния вмещающих пород.

Рассмотрим порядок решения основных вопросов интерпретации диаграмы индукционного каротажа.

Определение контакторов и мощностей пластов

Как показывают теоретические расчеты /Плюснин/, кривые индукционного каротажа имеют простую симметричную форму, без заметных искажений на границах пластов. Для определения мощ-

(рис 5 и 6)

ностей пластов применяется правило полумаксимума амплитуды аномалии. Мощность, найденная по этому правилу, обозначается $h_ф$ (фиктивная). При больших мощностях пластов ($h > 2L$) $h_ф$ совпадает с истинной мощностью, для маломощных пластов отличается от истинной мощности тем больше, чем меньше мощность пласта и чем больше отношения сопротивления пласта к сопротивлению вмещающих пород. Для маломощных пластов истинная мощность по $h_ф$ может быть найдена с помощью палетки рис.5.

Определение сопротивления пластов

Экстремальное значение кажущегося сопротивления против середины мощного пласта практически равно удельному сопротивлению пласта неограниченной площади. С уменьшением мощности пласта амплитуда аномалии уменьшается тем больше, чем меньше мощность пласта.

По кажущемуся сопротивлению, снятому с диаграммы индукционного каротажа, в случае отсутствия глубокого проникновения бурового раствора, можно определить истинное сопротивление пласта по номограммам рис.7. Эти номограммы рассчитаны для диаметра скважины равного 0 и для одинаковых сопротивлений подстилающих и покрывающих отложений. Цифр кривых- отношение $ρ_{пл}/ρ_{вм}$. Работа ведется в следующем порядке.

1. Производится отсчет $ρ_к$ против исследуемого пласта.

2. Определяется сопротивление вмещающих пород, как среднее арифметическое между сопротивлением подстилающих и покрывающих отложений.

3. Находится мощность пласта h, по описанным правилам.

4. Подсчитываются отношения $ρ_к/ρ_{вм}$; h/L

5. По номограмме рис.7 определяется истинное сопротивление пласта.

Пример интерпретации диаграмм индукционного каротажа приведен на рис.8.

В рассматриваемом интервале хорошо выделяются 2 мощных пласта нефтенасыщенных песчаников мощностью 6,5 и 7 м. Границы пласта легко отбиваются по диаграммам индукционного каротажа, КС и микрозондов. ~~(1967-1973,5 м).~~ (1936,5-19

Кажущееся сопротивление по индукционному каротажу составляет $\rho_к$ = 15 ом.м.

Сопротивление вмещающих пород составляет $\rho_{вм} = \frac{5+4}{2} = 4,5$ ом.м.

При длине зонда прибора ПМК-1 L = 0,75 м h/L = 6; $\frac{\rho_к}{\rho_{вм}} = 3,1$

Истинное сопротивление пласта, найденное по палетке, составляет 15 ом.м , т.е. при большой мощности пласта и малом диаметре скважины $\rho_к$, снятое с диаграммы индукционного каротажа, в первом приближении может быть принято за истинное сопротивление.

Как показывает рассмотренный пример, при благоприятных условиях по индукционному каротажу истинное сопротивление пластов может быть определено гораздо быстрее и дешевле, чем по БКЗ. Этим объясняется широкое распространение метода в последние годы за границей, особенно в США.

З а д а н и е

1. Скопировать задание.
2. Определить мощность нефтеносных пластов по И К.
3. Определить сопротивление нефтеносных пластов.
   Все исходные данные занести в таблицу.

Таблица

N пласта	Интервал	h (м)	$\rho_к$ (ом.м)	$\rho_{вм}$ (ом.м)	$\frac{\rho_к}{\rho_{вм}}$	$\frac{h}{L}$	M	$\rho_{пл}$ (ом.м)

4. Сравнить полученные данные с результатами интерпретации БКЗ. Если существуют расхождения между данными этих методов, объяснить их причину.
5. Написать отчет по проделанной работе.

Составил: Сковородников А.Г.

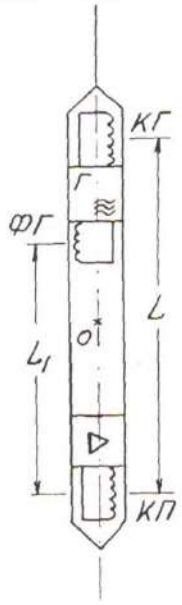


Рис. 1. Зонд индукционного каротажа

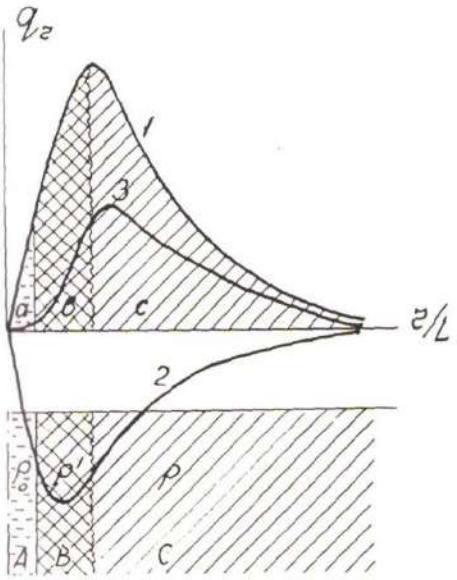


Рис 2 Радиальный геометрический фактор 1-двухкатушечного зонда КП-КГ, 2-дополнительного зонда ФГ-КП, 3-трехкатушечного зонда

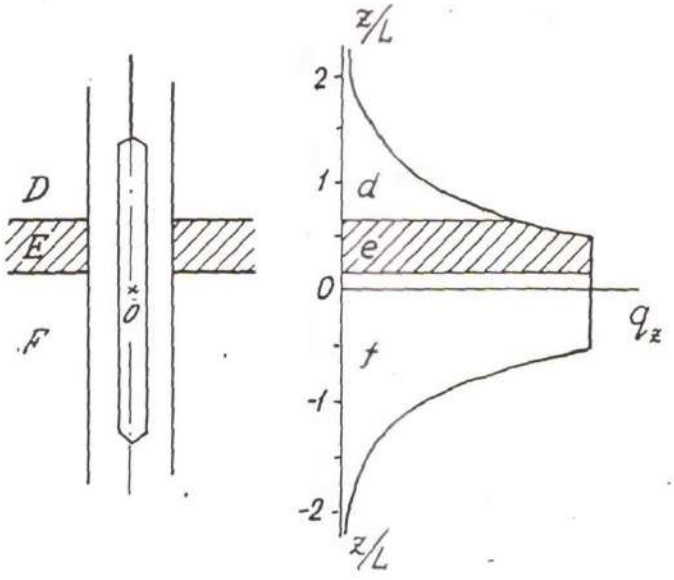


Рис. 3 - Вертикальный геометрический фактор зонда ИК

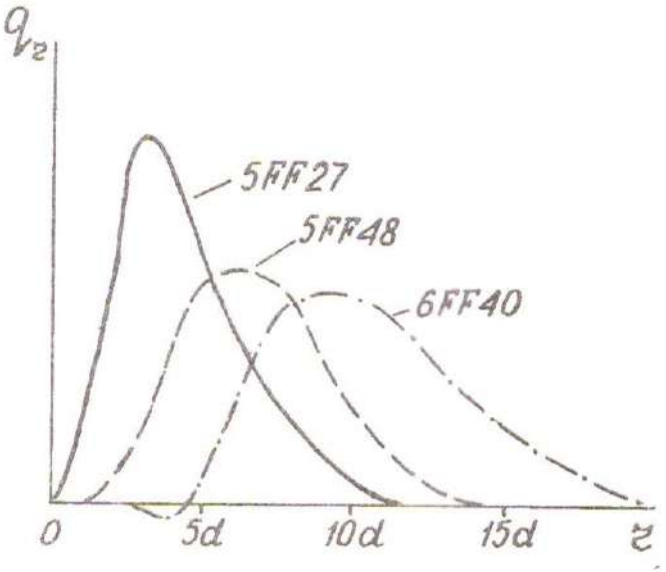


Рис. 4. Графики радиального геометрического фактора нескольких многокатушечных зондов ИК

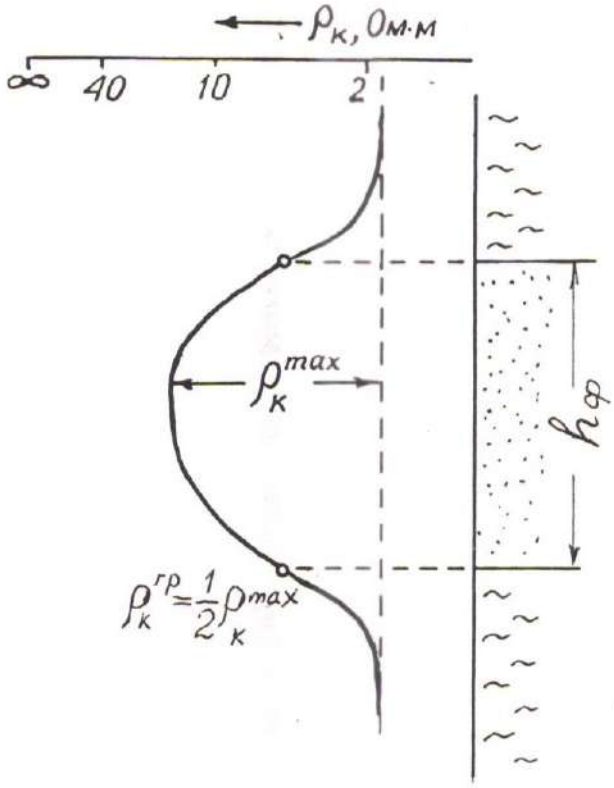


Рис 5. Определение фактической мощности пласта $h_ф$ по правилу полумаксимума аномалии ИК

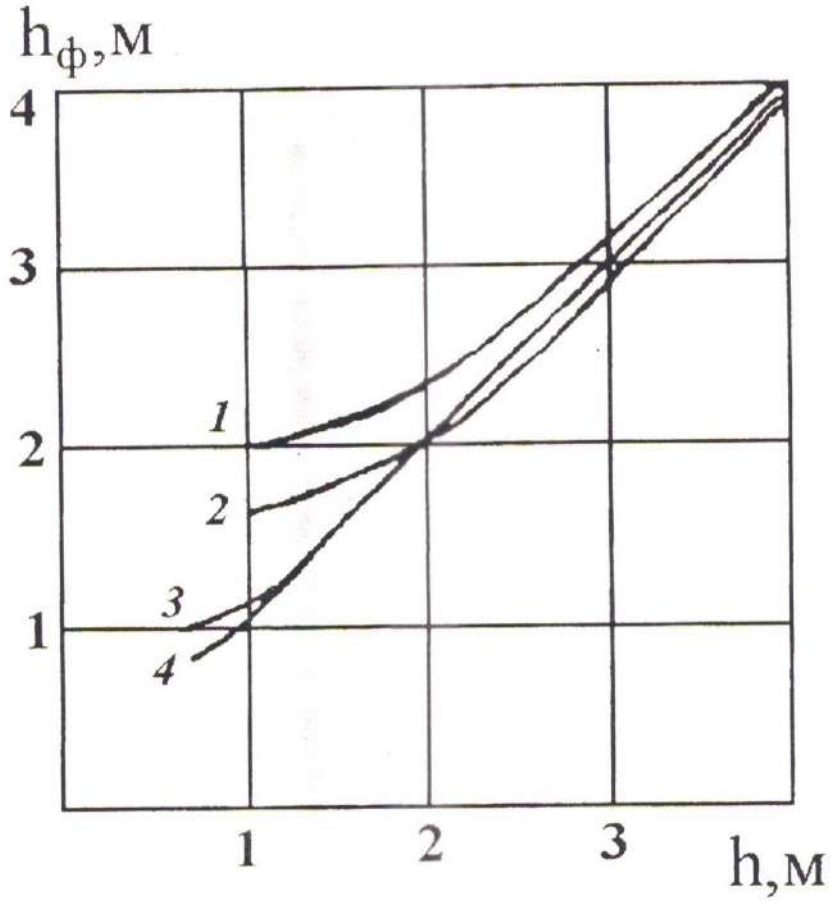


Рис. 6. Зависимости фиктивной мощности $h_ф$ от фактической для зондов 5Ф1,2 (кривые 1,2) и 6Ф1 (кривые 3,4)

1 и 3 – $\rho_{пл} < \rho_{см}$; 2 и 4 – $\rho_{пл} > \rho_{см}$

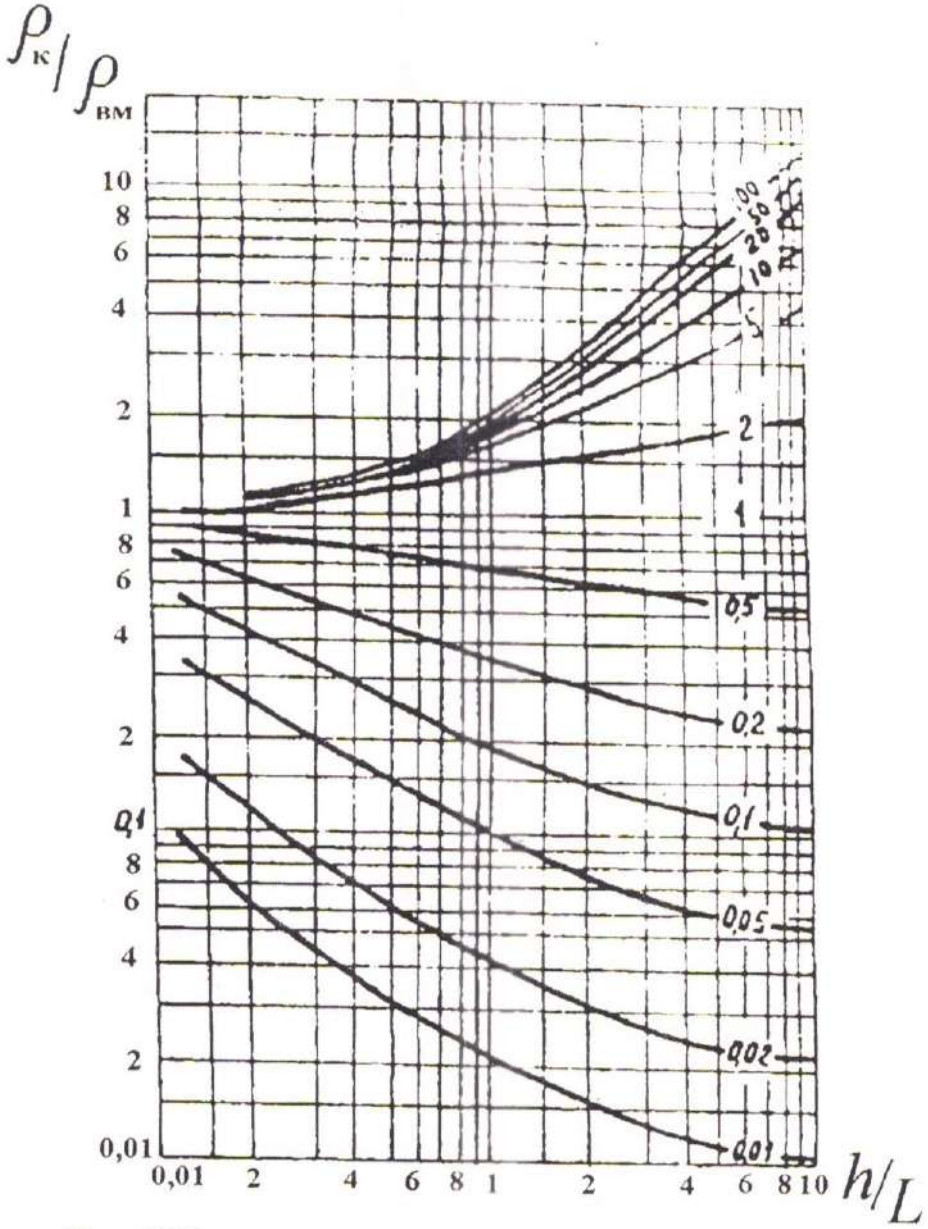


Рис. 7. Палетка для определения истинного удельного сопротивления пород по данным индукционного метода

Шифр кривых $\frac{\rho_{пл}}{\rho_{вм}}$

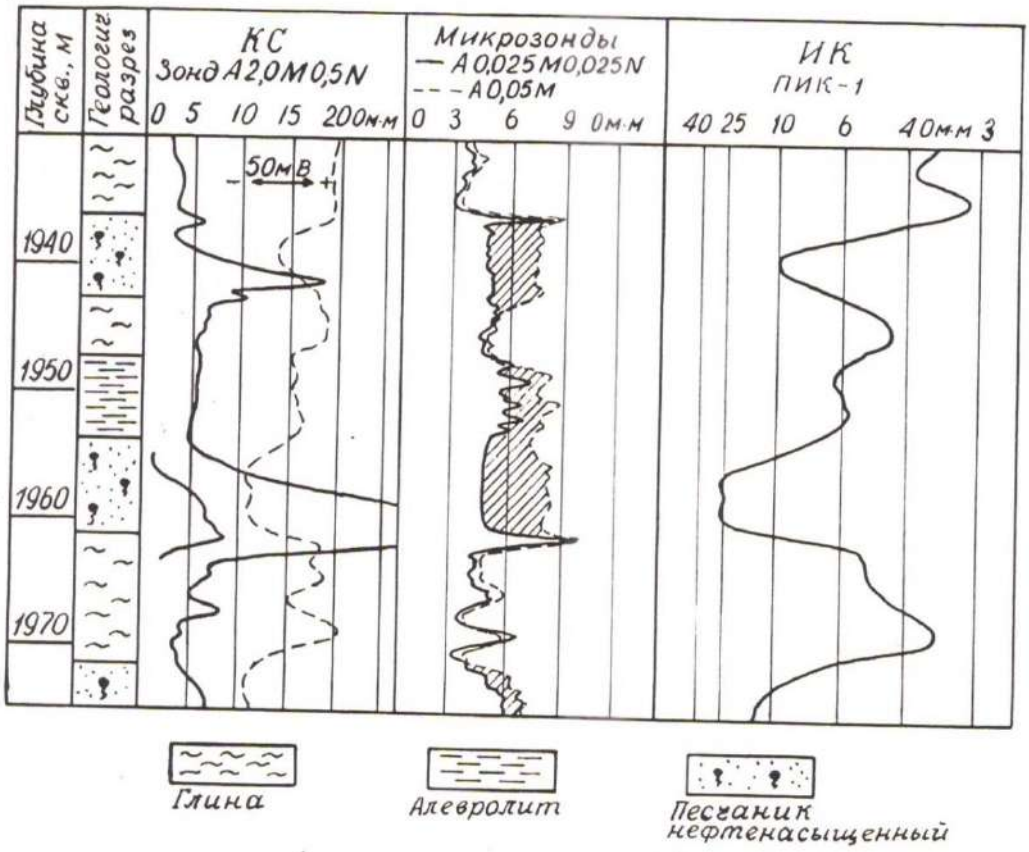


Рис 8. Пример интерпретации диаграмм ИК в комплексе с диаграммами КС, ПС и микрозондов (Скв. №4, Вингинская площадь, Тюменская обл.)

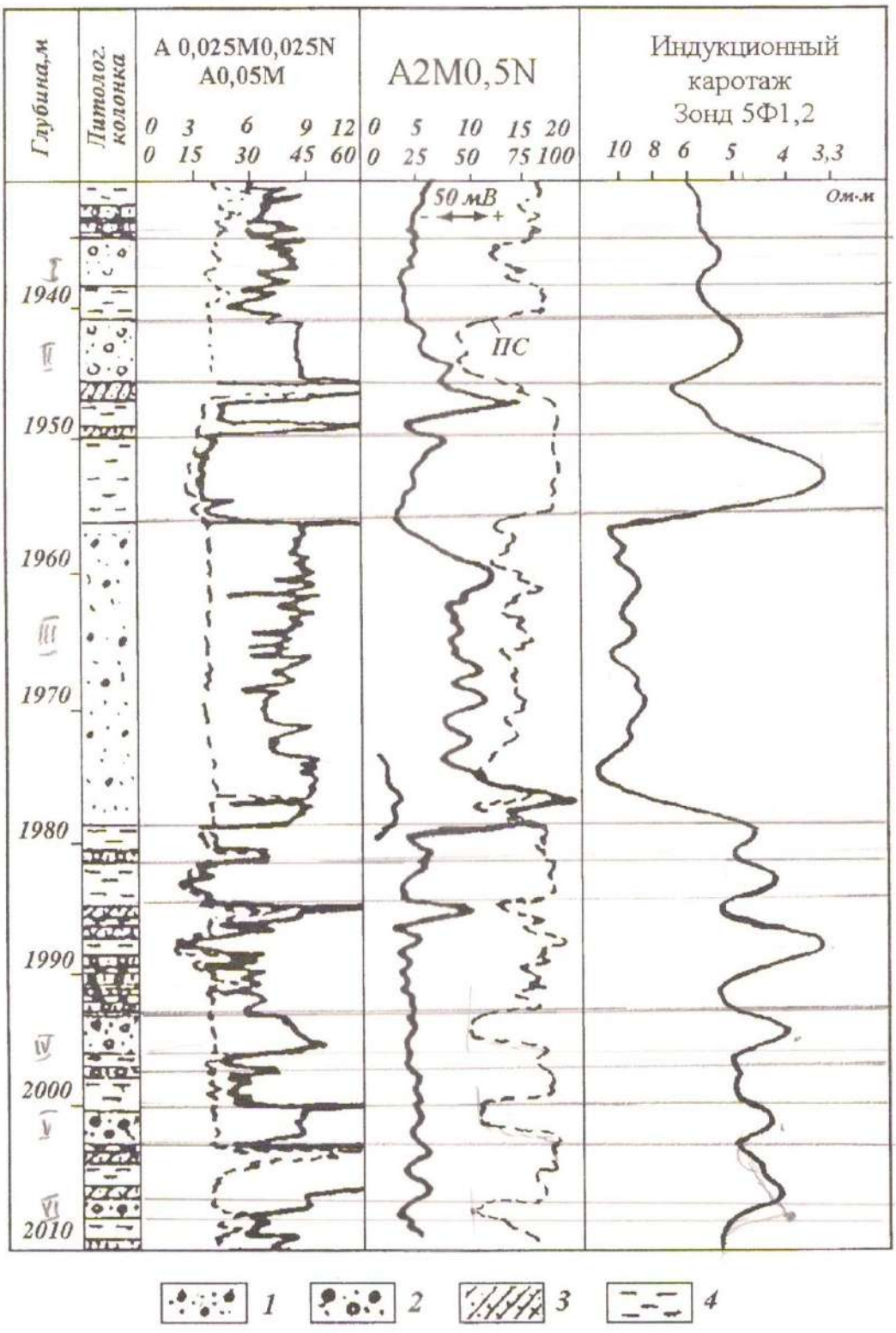


Рис. 7 Диаграммы индукционного и электрического каротажа d=0,19 м; ρ_c =2 Ом·м

1 -песчаник нефтеносный,

2- песчаник водоносный,

3- песчаник уплотненный,

4- глина

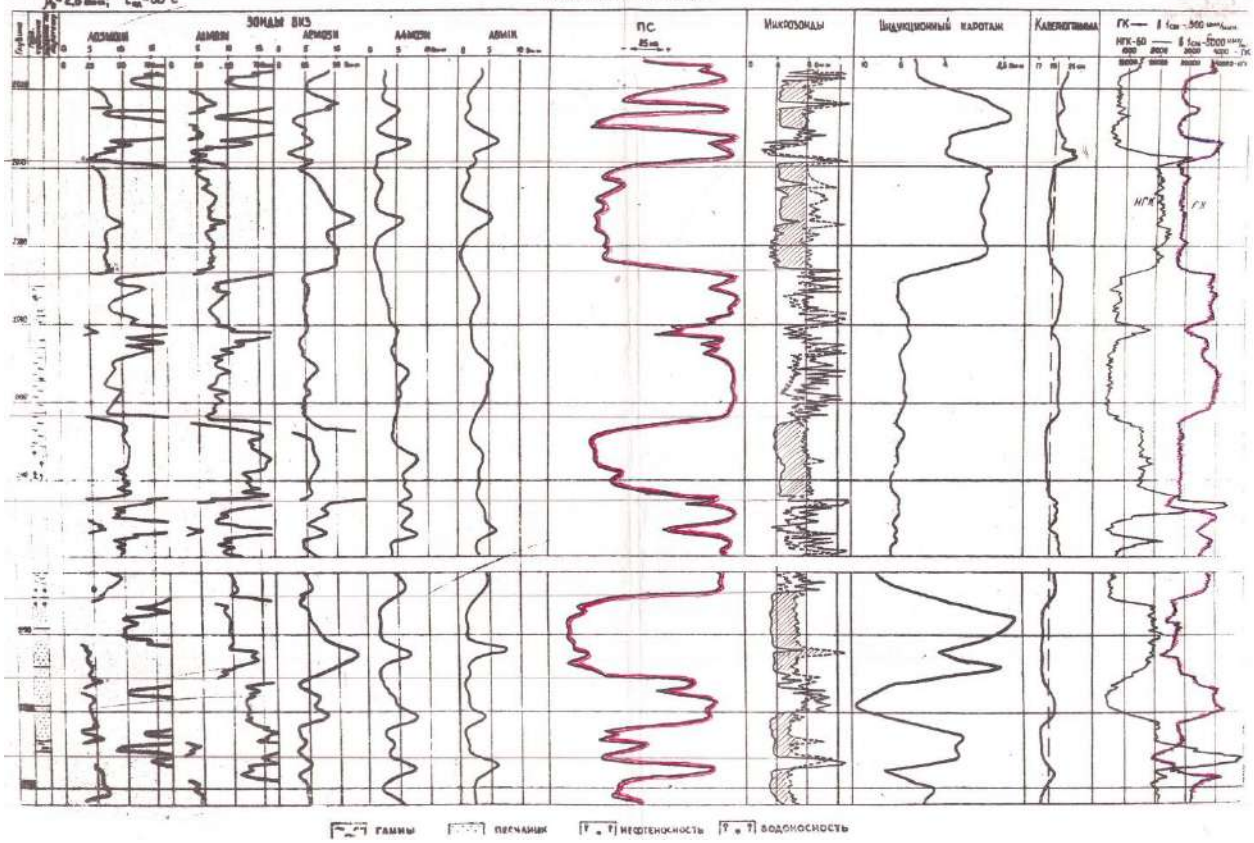
Комплекс каротажных диаграмм

По скважине 136

Ватинская площадь

Работа № 8,9 I вариант

$\rho_в$=2,8 Ом·м; $t_{вн}$=60°С



Комплекс каротажных диаграмм

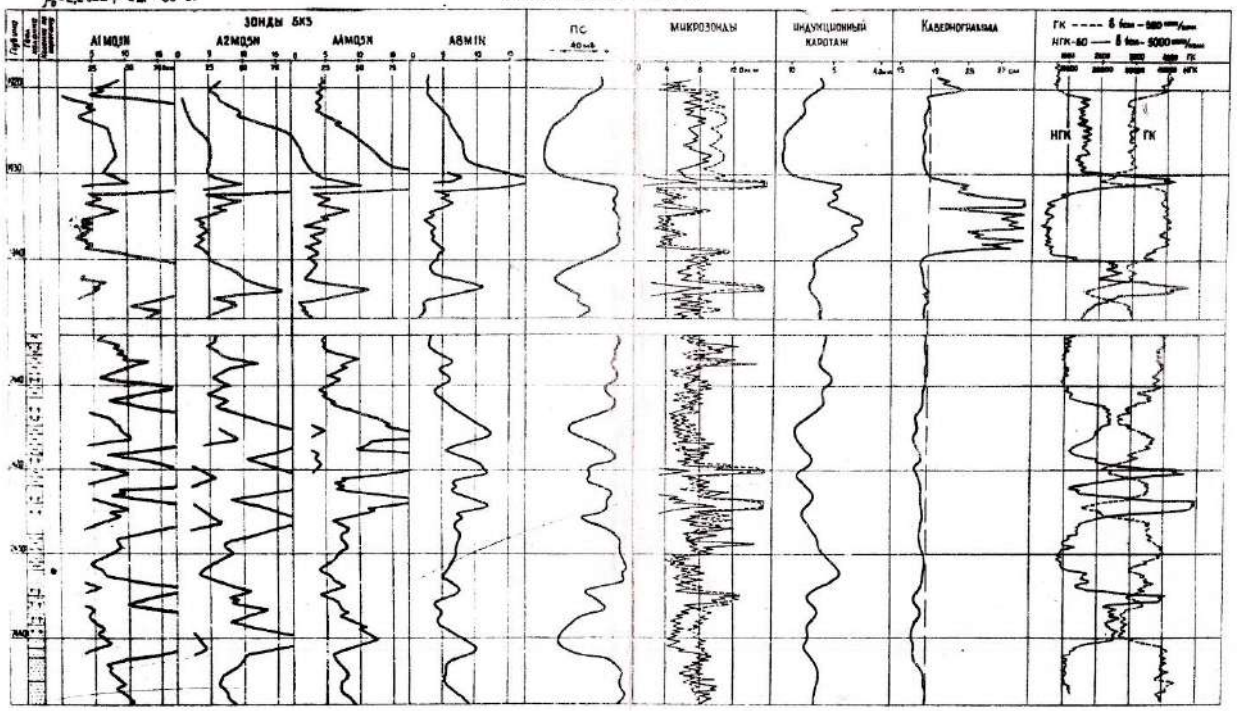
По скважине 245

Мамонтовская площадь

III вариант

Работа №8,9

$\rho_в$=2,2 Ом·м, $t_{вн}$=60°С



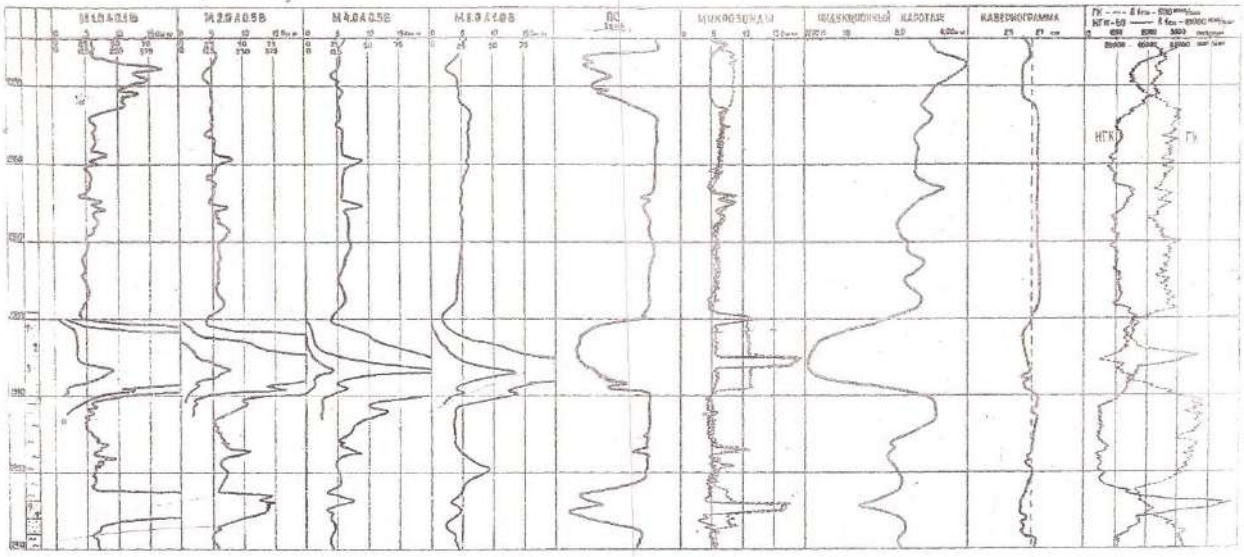
Условные обозначения:

глины · песчаник · нефтеносность · водоносность

Комплекс каротажных диаграмм по скв. №4

Мамонтовская площадь

Работа №9 | 8 вариант | $\rho_0 = 4{,}8$ ом | $t = 60°$с



Условные обозначения:

газ | песчаник | нефтеносность | водоносность

Работа N

Интерпретация результатов метода ВИКИЗ

ВИКИЗ расшифровывается как "высокочастотное индукционное каротажное изопараметрическое зондирование". Метод разработан в Институте геологии и геофизики Сибирского отделения РАН под руководством проф. Ю. Н. Антонова.

По своей сути ВИКИЗ является вариантом боковых каротажных зондирований (БКЗ) в индукционном исполнении. В методе используется принцип частотно-геометрического зондирования, в котором увеличение глубины исследований достигается, во-первых, за счет увеличения длины зонда, и, во-вторых, за счет уменьшения частоты электромагнитного поля.

Аппаратура ВИКИЗ содержит 5 трехкатушечных зондов разной длины, работающих каждый на своей частоте, которые поочередно подключаются к измерительной линии. Измеряемой величиной является разность фаз сигнала в двух приемных катушках, которая передается на поверхность в виде цифрового кода.

Применение двух измерительных катушек позволяет минимизировать влияние на результаты измерений самой скважины.

Изопараметричность понимается как сохранение одинаковых показаний всех зондов в одной и той же однородной среде с постоянным значением электропроводности.

Для достижения изопараметричности выполняются два условия:

1. $L \cdot \sqrt{f} = \text{const}_1$,

2. $\frac{\Delta L}{L} = \text{const}_2$,



где ΔL – база; L – длина зонда; f – частота.

Если показания разных зондов не совпадают между собой, это свидетельствует о радиальной неоднородности удельного электрического сопротивления УЭС.

Т.к. все зонды имеют разную длину и разную частоту электромагнитного поля, то основной вклад в измеряемый сигнал вносят цилиндрические зоны, неодинаково удаленные от оси зонда. Чем меньше частота и чем больше длина зонда, тем больше удалена от оси зонда область, влияющая на его показания.

По этой причине показания малых зондов характеризуют УЭС зоны проникновения, а больших – неизмененной части пласта.

~~Аппаратура ВИКИЗ~~

Аппаратура ВИКИЗ обеспечивает измерение разности фаз $\Delta\varphi$ между ЭДС, индуцируемыми в измерительных катушках 5 трехкатушечных зондов. Соответственно в процессе каротажа регистрируются 5 кривых, характеризующих кажущееся сопротивление среды на разном удалении от оси скважины. Для упрощения конструкции зонда одна и та же приемная катушка используется в двух соседних зондах.

Предусмотрена возможность регистрации только одной диаграммы индукционного каротажа с зондом, который может быть выбран с поверхности. Скважинный снаряд ВИКИЗ имеет специальный электрод для записи ПС.

На рис. 1 показано расположение генераторных и измерительных катушек в скважинном приборе ВИКИЗ, а в таблице приведены частотно-геометрические характеристики всех зондов.

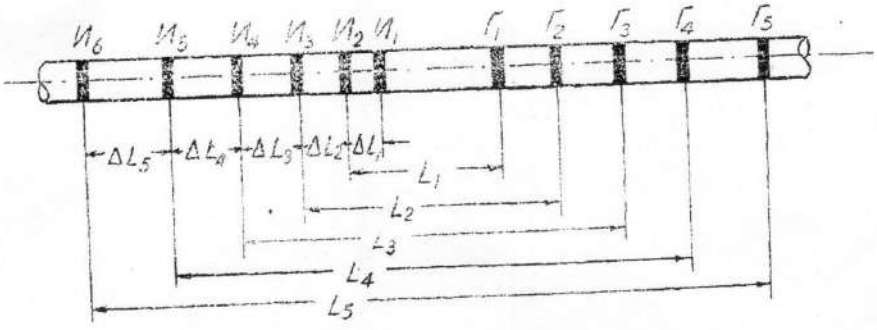


Рис. . Конструкция многокатушечного зонда ВИКИЗ

~~$И_3 0{,}1 И_2 0{,}57 Г_2$~~

Таблица 8.2

Частотно-геометрические характеристики зондов ВИКИЗ

№ п/п	Символ зонда	Длина зонда, L (м)	База зонда, ΔL, (м)	Частота, f, (МГц)
1.	$И_3 0{,}1 И_2 0{,}40 Г_2$	0,50	0,10	20,0
2.	$И_3 0{,}14 И_2 0{,}57 Г_2$	0,71	0,14	8,0
3.	$И_3 0{,}20 И_2 0{,}80 Г_2$	1,00	0,20	4,0
4.	$И_3 0{,}28 И_2 1{,}13 Г_2$	1,41	0,28	2,0
5.	$И_6 0{,}40 И_3 1{,}60 Г_2$	2,00	0,40	0,8

Вертикальные и радиальные исследовательские характеристики зондов ВИКИЗ оптимизированы для геолого-технологических условий нефтегазовых месторождений Западной Сибири.

~~**Интерпретация результатов ВИКИЗ**~~

При интерпретации результатов ВИКИЗ выделяют в разрезе интервалы, где наблюдается расхождение диаграмм зондов разной длины с превышением показаний малых зондов над показаниями больших. Эти интервалы соответствуют пластам-коллекторам с повышающим проникновением бурового раствора.

Далее осредняют диаграмму каждого зонда в пределах пласта и строят кривую зондирования – $\rho_К = f(L)$. Если пласты имеют достаточно большую мощность, и на результаты измерений мало влияют вмещающие породы, кривые получаются близкими к теоретическим.

Для интерпретации результатов ВИКИЗ разработано программное обеспечение, которое посредством подбора кривых зондирования позволяет определить для каждой радиальной зоны, включая водную оторочку, ее УЭС и толщину. (М. И. Эпов, Ю. Н. Антонов, 2000).

На рис. 2 приведен фрагмент геологического разреза одной из скважин в Тюменской области с диаграммами ВИКИЗ (*а*), кривыми зондирования для нескольких пластов (*б*) и результатами их машинной интерпретации (*в*).

Сопоставление результатов ВИКИЗ и БКЗ показывает, что ~~во~~ по величине сопротивления пласта оба метода дают очень близкие показания, а вот по величине ρ' и D имеются большие расхождения. При этом ВИКИЗ позволяет более детально изучить строение зоны проникновения и определить УЭС ее различных частей, включая полностью промытые породы и окаймляющую зону "водной оторочки" в нефтенасыщенных коллекторах.

Неблагоприятными условиями для метод ВИКИЗ являются наличие высокоомных пород и сочетание низкоомного бурового раствора ($\rho_0 < 0{,}01$ Ом·м) и его глубокого понижающего проникновения.

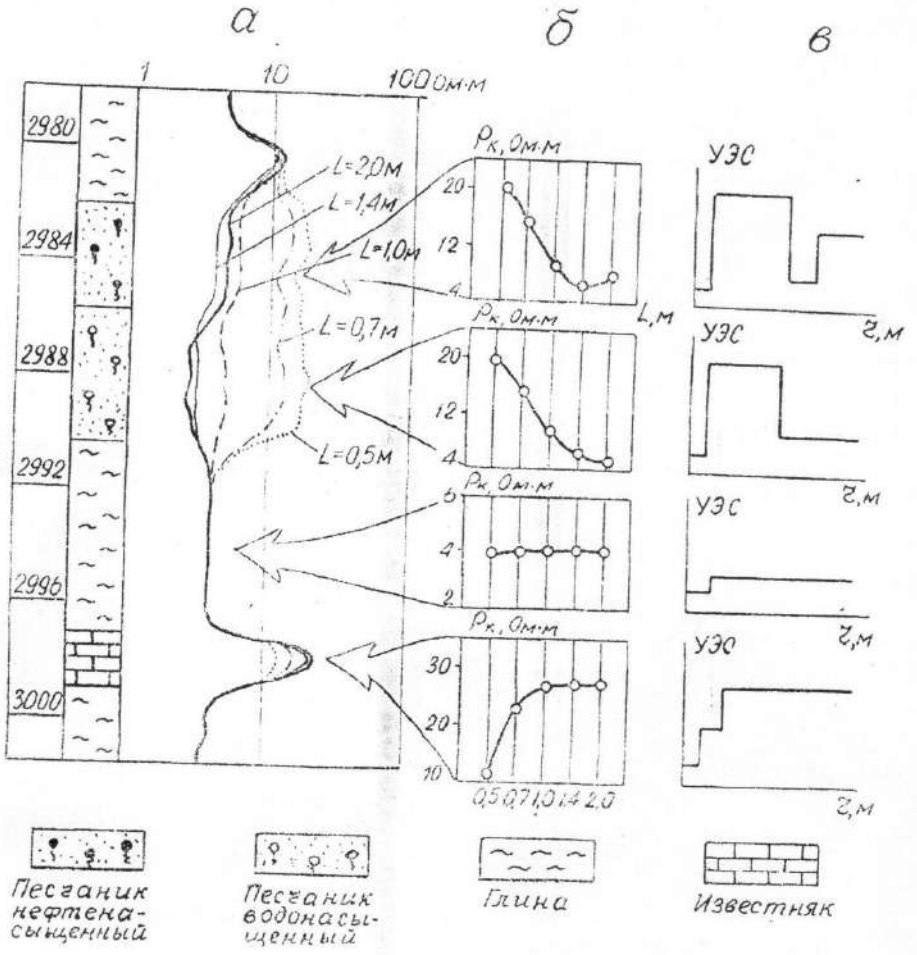


Рис. 21. Диаграммы ВИКИЗ (*а*), кривые зондирования (*б*) и результаты их машинной интерпретации (*в*) по одной из нефтеразведочных скважин.

З А Д А Н И Е

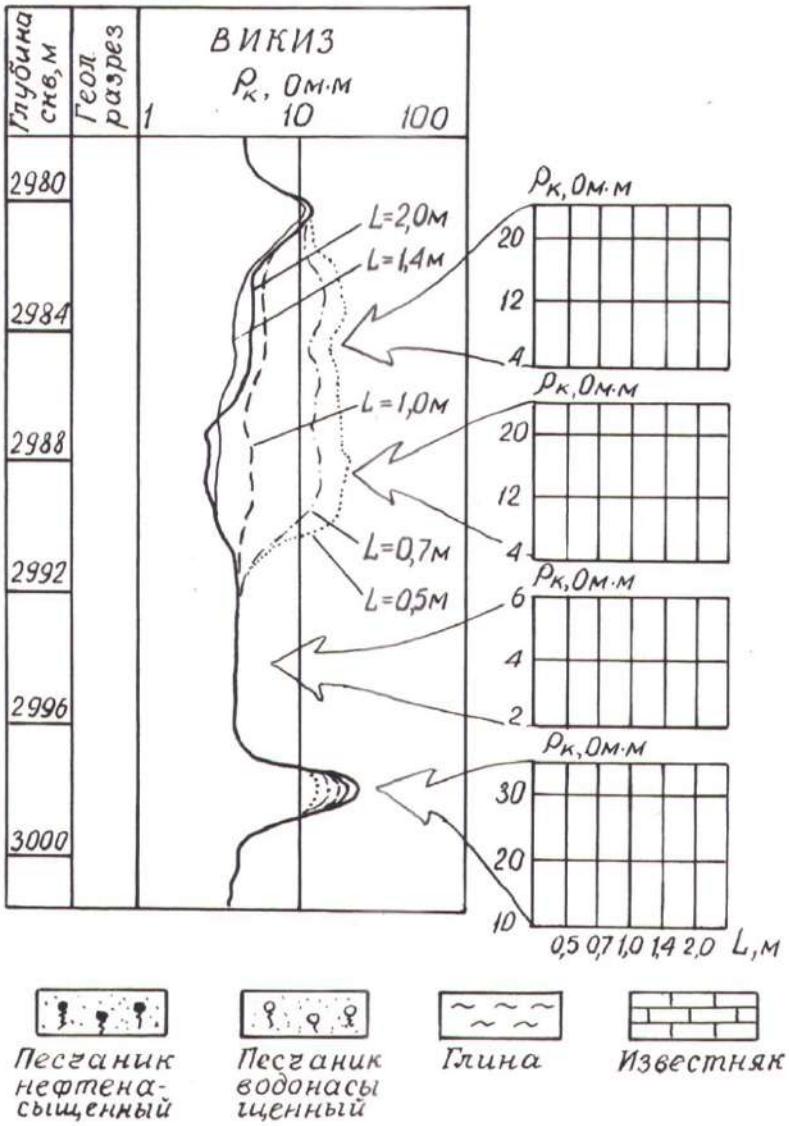
1. Постройте кривые зондирования $\rho_к = f(L)$ для всех выделенных участков разреза скважины.

2. По каждой кривой определите характер проникновения фильтрата бурового раствора в пласт и характер насыщения пластов-коллекторов

3. Напишите отчет по проделанной работе.

I вар.

Ф.И.О. студента



ЗАДАНИЕ

1. Постройте кривые зондирования для интервалов, указанных стрелками.

2. Определите литологический состав пород в этих интервалах скважины.

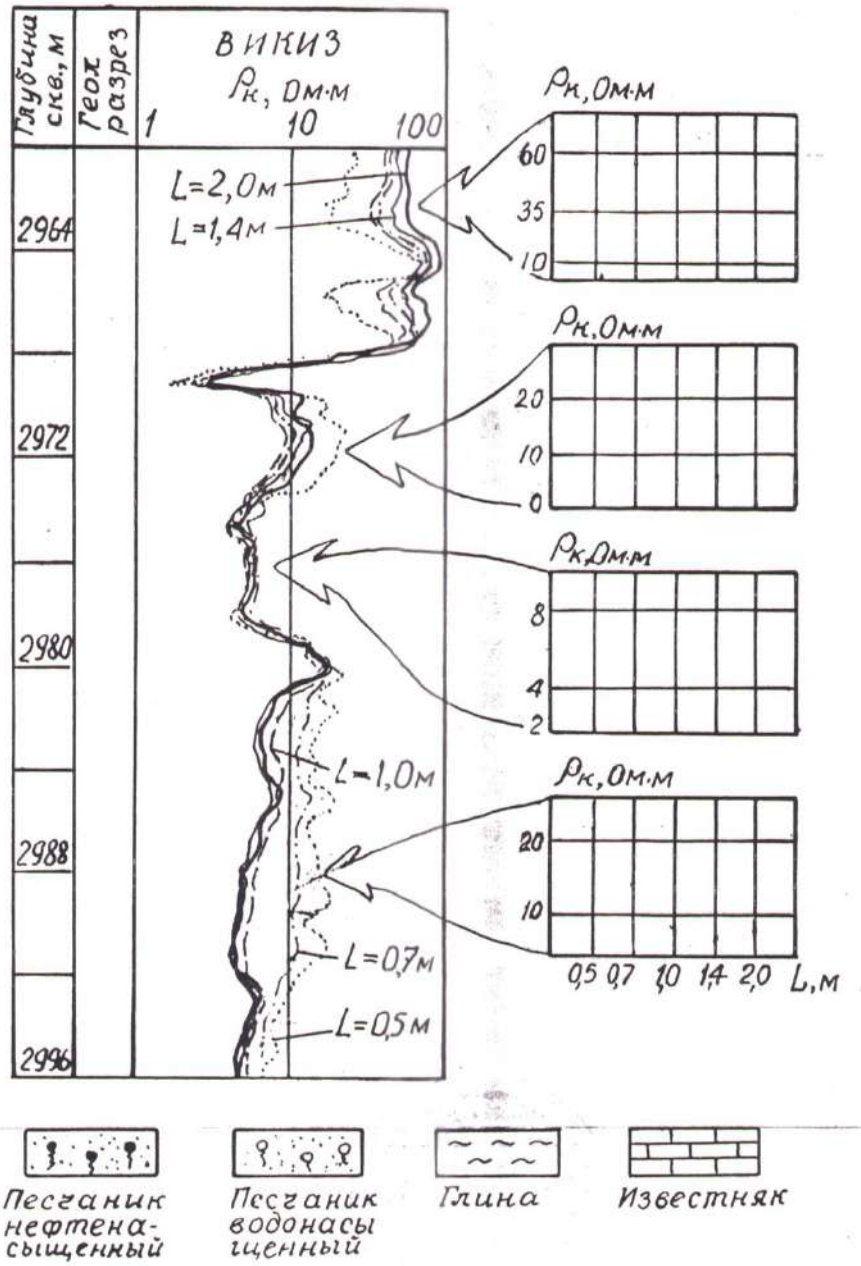
3. Для песчаного пласта-коллектора оцените характер насыщения.

4.Постройте геологический разрез для представленного фрагмента скважины.

5. Напишите отчет по проделанной работе.

II вар.

Ф.И.О. студента



ЗАДАНИЕ

1. Постройте кривые зондирования для интервалов, указанных стрелками.
2. Определите литологический состав пород в этих интервалах скважины.
3. Для песчаного пласта-коллектора оцените характер насыщения.
4. Постройте геологический разрез для представленного фрагмента скважины.
5. Напишите отчет по проделанной работе.

Работа N

Интерпретация результатов метода ВИКИЗ

ВИКИЗ расшифровывается как "высокочастотное индукционное каротажное изопараметрическое зондирование". Метод разработан в Институте геологии и геофизики Сибирского отделения РАН под руководством проф. Ю. Н. Антонова.

По своей сути ВИКИЗ является вариантом боковых каротажных зондирований (БКЗ) в индукционном исполнении. В методе используется принцип частотно-геометрического зондирования, в котором увеличение глубины исследований достигается, во-первых, за счет увеличения длины зонда, и, во-вторых, за счет уменьшения частоты электромагнитного поля.

Аппаратура ВИКИЗ содержит 5 трехкатушечных зондов разной длины, работающих каждый на своей частоте, которые поочередно подключаются к измерительной линии. Измеряемой величиной является разность фаз сигнала в двух приемных катушках, которая передается на поверхность в виде цифрового кода.

Применение двух измерительных катушек позволяет минимизировать влияние на результаты измерений самой скважины.

Изопараметричность понимается как сохранение одинаковых показаний всех зондов в одной и той же однородной среде с постоянным значением электропроводности.

Для достижения изопараметричности выполняются два условия:

1. $L \cdot \sqrt{f} = \text{const}_1$,

2. $\frac{\Delta L}{L} = \text{const}_2$,



где ΔL – база; L – длина зонда; f – частота.

Если показания разных зондов не совпадают между собой, это свидетельствует о радиальной неоднородности удельного электрического сопротивления УЭС.

Т.к. все зонды имеют разную длину и разную частоту электромагнитного поля, то основной вклад в измеряемый сигнал вносят цилиндрические зоны, неодинаково удаленные от оси зонда. Чем меньше частота и чем больше длина зонда, тем больше удалена от оси зонда область, влияющая на его показания.

По этой причине показания малых зондов характеризуют УЭС зоны проникновения, а больших – неизмененной части пласта.

~~Аппаратура ВИКИЗ~~

Аппаратура ВИКИЗ обеспечивает измерение разности фаз $\Delta\varphi$ между ЭДС, индуцируемыми в измерительных катушках 5 трехкатушечных зондов. Соответственно в процессе каротажа регистрируются 5 кривых, характеризующих кажущееся сопротивление среды на разном удалении от оси скважины. Для упрощения конструкции зонда одна и та же приемная катушка используется в двух соседних зондах.

Предусмотрена возможность регистрации только одной диаграммы индукционного каротажа с зондом, который может быть выбран с поверхности. Скважинный снаряд ВИКИЗ имеет специальный электрод для записи ПС.

На рис. 1 показано расположение генераторных и измерительных катушек в скважинном приборе ВИКИЗ, а в таблице приведены частотно-геометрические характеристики всех зондов.

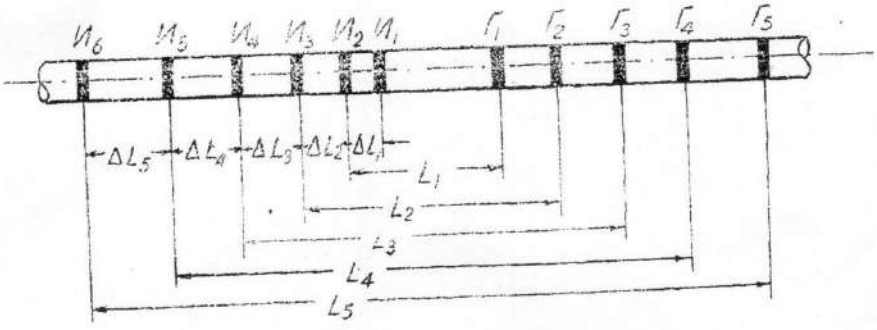


Рис. . Конструкция многокатушечного зонда ВИКИЗ

~~$И_3 0{,}1 И_2 0{,}57 Г_2$~~

Таблица 8.2

Частотно-геометрические характеристики зондов ВИКИЗ

№ п/п	Символ зонда	Длина зонда, L (м)	База зонда, ΔL, (м)	Частота, f, (МГц)
1.	$И_3 0{,}1 И_2 0{,}40 Г_2$	0,50	0,10	20,0
2.	$И_3 0{,}14 И_2 0{,}57 Г_2$	0,71	0,14	8,0
3.	$И_3 0{,}20 И_2 0{,}80 Г_2$	1,00	0,20	4,0
4.	$И_3 0{,}28 И_2 1{,}13 Г_2$	1,41	0,28	2,0
5.	$И_6 0{,}40 И_3 1{,}60 Г_2$	2,00	0,40	0,8

Вертикальные и радиальные исследовательские характеристики зондов ВИКИЗ оптимизированы для геолого-технологических условий нефтегазовых месторождений Западной Сибири.

~~**Интерпретация результатов ВИКИЗ**~~

При интерпретации результатов ВИКИЗ выделяют в разрезе интервалы, где наблюдается расхождение диаграмм зондов разной длины с превышением показаний малых зондов над показаниями больших. Эти интервалы соответствуют пластам-коллекторам с повышающим проникновением бурового раствора.

Далее осредняют диаграмму каждого зонда в пределах пласта и строят кривую зондирования – $\rho_К = f(L)$. Если пласты имеют достаточно большую мощность, и на результаты измерений мало влияют вмещающие породы, кривые получаются близкими к теоретическим.

Для интерпретации результатов ВИКИЗ разработано программное обеспечение, которое посредством подбора кривых зондирования позволяет определить для каждой радиальной зоны, включая водную оторочку, ее УЭС и толщину. (М. И. Эпов, Ю. Н. Антонов, 2000).

На рис. 2 приведен фрагмент геологического разреза одной из скважин в Тюменской области с диаграммами ВИКИЗ (*а*), кривыми зондирования для нескольких пластов (*б*) и результатами их машинной интерпретации (*в*).

Сопоставление результатов ВИКИЗ и БКЗ показывает, что ~~во~~ по величине сопротивления пласта оба метода дают очень близкие показания, а вот по величине ρ' и D имеются большие расхождения. При этом ВИКИЗ позволяет более детально изучить строение зоны проникновения и определить УЭС ее различных частей, включая полностью промытые породы и окаймляющую зону "водной оторочки" в нефтенасыщенных коллекторах.

Неблагоприятными условиями для метод ВИКИЗ являются наличие высокоомных пород и сочетание низкоомного бурового раствора ($\rho_0 < 0{,}01$ Ом·м) и его глубокого понижающего проникновения.

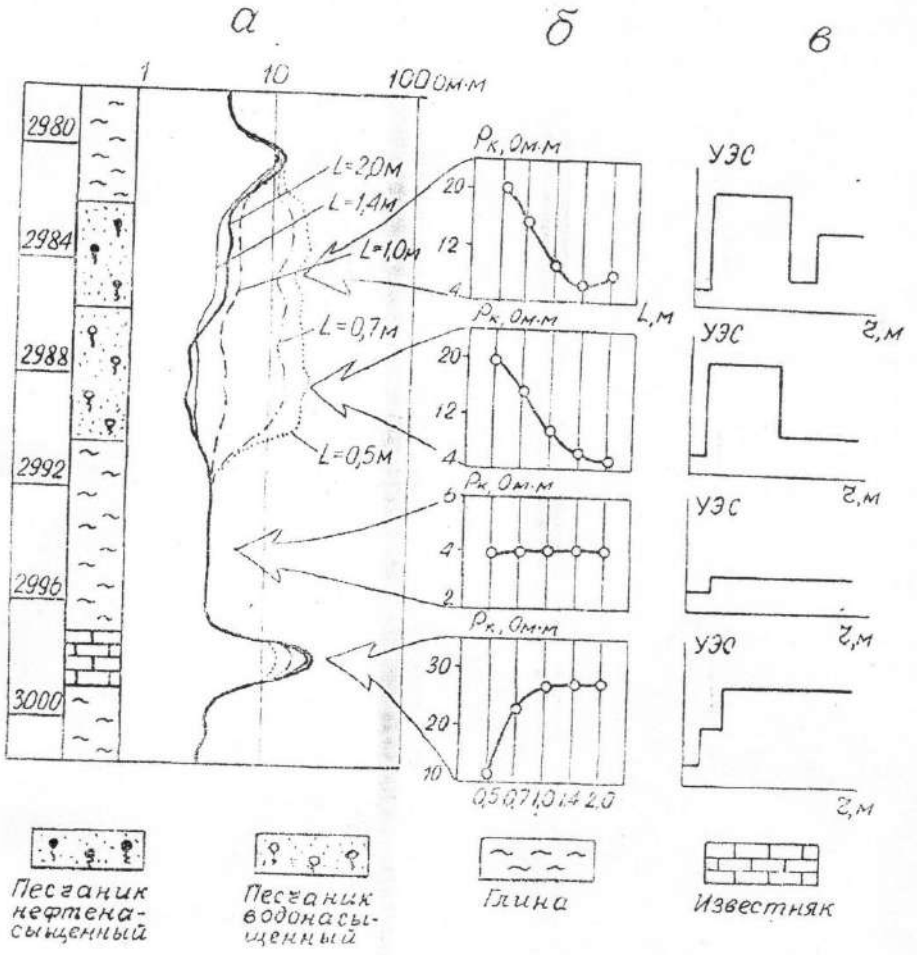


Рис. 21. Диаграммы ВИКИЗ (*а*), кривые зондирования (*б*) и результаты их машинной интерпретации (*в*) по одной из нефтеразведочных скважин.

З А Д А Н И Е

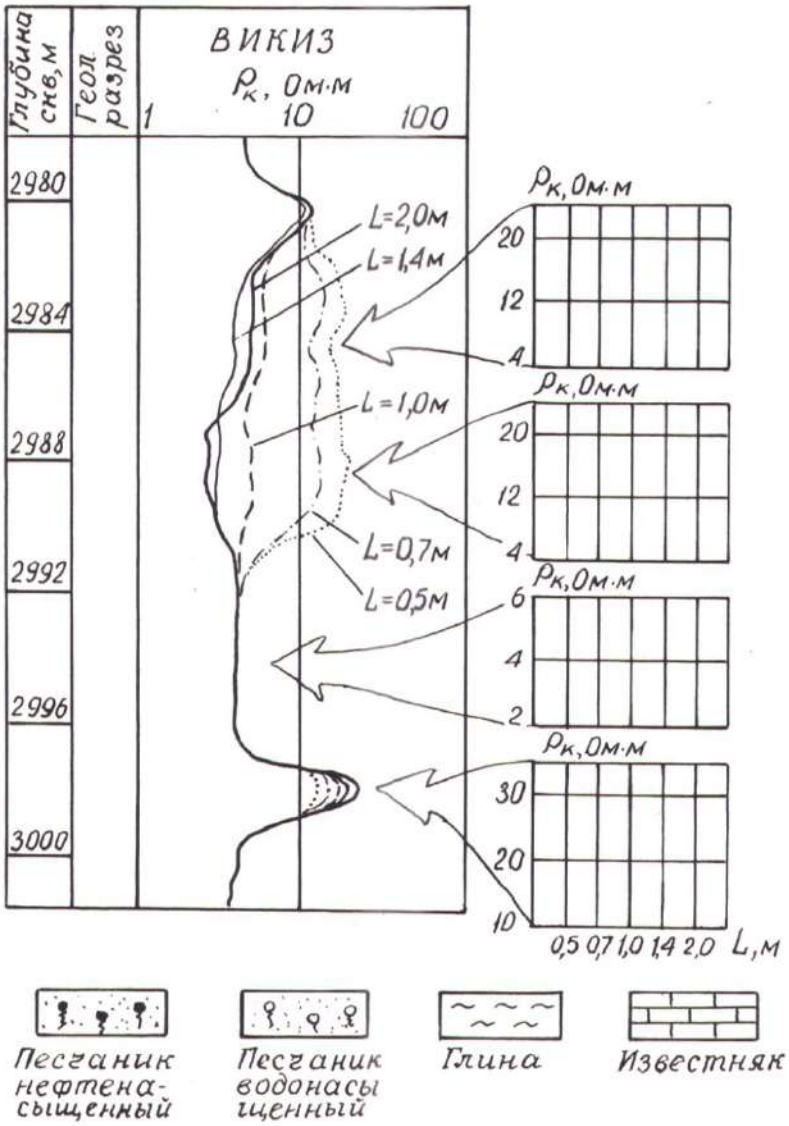
1. Постройте кривые зондирования $\rho_к = f(L)$ для всех выделенных участков разреза скважины.

2. По каждой кривой определите характер проникновения фильтрата бурового раствора в пласт и характер насыщения пластов-коллекторов

3. Напишите отчет по проделанной работе.

I вар.

Ф.И.О. студента



ЗАДАНИЕ

1. Постройте кривые зондирования для интервалов, указанных стрелками.

2. Определите литологический состав пород в этих интервалах скважины.

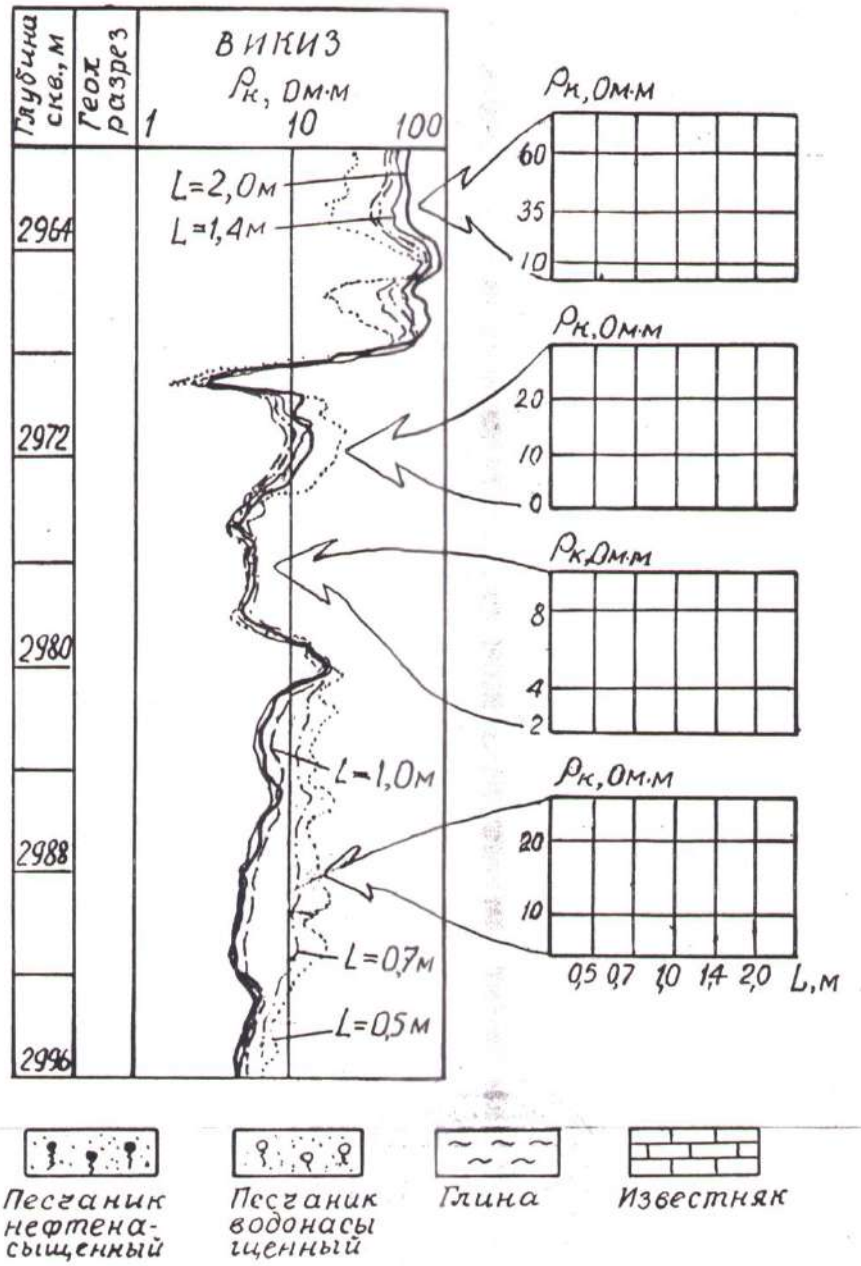
3. Для песчаного пласта-коллектора оцените характер насыщения.

4.Постройте геологический разрез для представленного фрагмента скважины.

5. Напишите отчет по проделанной работе.

II вар.

Ф.И.О. студента



ЗАДАНИЕ

1. Постройте кривые зондирования для интервалов, указанных стрелками.
2. Определите литологический состав пород в этих интервалах скважины.
3. Для песчаного пласта-коллектора оцените характер насыщения.
4. Постройте геологический разрез для представленного фрагмента скважины.
5. Напишите отчет по проделанной работе.

§ 7. МЕТОД ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ [13]

Диэлектрическая проницаемость ε наряду с удельным электрическим сопротивлением ρ и магнитной проницаемостью μ является физическим свойством породы, определяющим характер электромагнитного поля. Абсолютная диэлектрическая проницаемость определяется соотношением $\varepsilon_a = D/E$, показывающим, во сколько раз напряженность электрического поля E в данном диэлектрике меньше напряженности поля индукции D в вакууме. Чаще пользуются не абсолютной ε_a, а относительной диэлектрической проницаемостью*) $\varepsilon = \varepsilon_a/\varepsilon_0$, характеризующей отношение величины ε_a данной среды к значению ε_0 абсолютной диэлектрической проницаемости в вакууме.

Значение $\varepsilon_п$ всегда больше единицы вследствие поляризации диэлектрика в электрическом поле. Для большинства минералов осадочных пород типична поляризация смещения ($\varepsilon = 4 \div 10$).

Ориентационная поляризация характерна для воды ($\varepsilon = 81$) и нефти ($\varepsilon = 2 \div 3$). Величина $\varepsilon_п$ осадочных пород определяется в основном их влажностью w, возрастая с увеличением w, поскольку значение $\varepsilon_в$ для воды на порядок выше, чем для минерального скелета.

Для мономинеральной полностью водонасыщенной осадочной породы

$$\varepsilon_{вп} = k_п \varepsilon_в + (1 - k_п)\varepsilon_{ск}, \qquad (19)$$

где $\varepsilon_{ск}$ – диэлектрическая проницаемость минерального скелета породы. Значения $\varepsilon_{ск}$ для некоторых наиболее распространенных породообразующих минералов: кварц – 4,7; кальцит – 8,1; доло-

*) В дальнейшем изложении приводятся относительные значения.

мит – 9,8. Для нефте-, газонасыщенного мономинерального коллектора

$$\varepsilon_{п} = k_{п}\varepsilon_{фл} + (1 - k_{п})\varepsilon_{ск}, \qquad (20)$$

где $\varepsilon_{фл}$ – диэлектрическая проницаемость жидкости, заполняющей поры. В неизмененной части нефтеносного коллектора $\varepsilon_{фл} = k_{в}\varepsilon_{в} + (1 - k_{в})\varepsilon_{н}$, газоносного коллектора – $\varepsilon_{фл} = k_{в}\varepsilon_{в} + (1 - k_{в})\varepsilon_{г}$. В промытой зоне нефтеносного коллектора выражения аналогичны, но $k_{в} = k_{впп}$. Здесь $\varepsilon_{н}$, $\varepsilon_{г}$ – соответственно значения диэлектрической проницаемости для нефти и газа в пластовых условиях.

В глинах $\varepsilon_{п}$ также определяется выражением (19), где $\varepsilon_{ск}$ есть значение $\varepsilon_{гл}$ сухой глины. Соотношение значений $\varepsilon_{п}$ продуктивных и водоносных коллекторов, а также неколлекторов для геологического объекта с мономинеральным составом пород иллюстрирует рис. 44.

На нем две главные линии *1* и *2* характеризуют соответственно связи: для полностью водонасыщенных пород-коллекторов и неколлекторов $\varepsilon_{вп} = f(k_{п})$; для предельно насыщенных нефтью

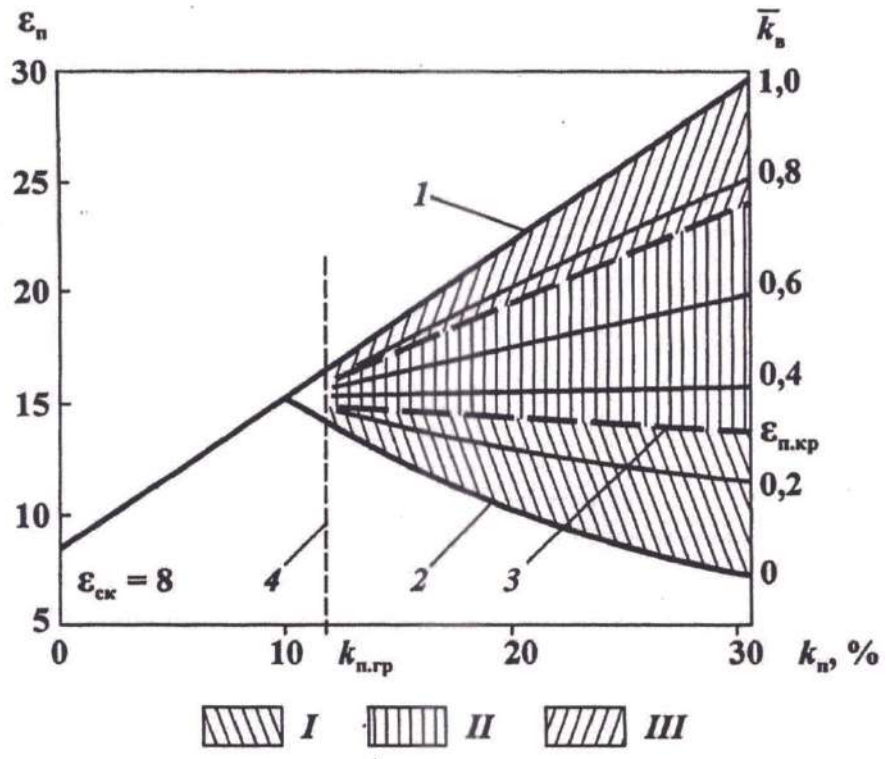


Рис. 44. Зависимость $\varepsilon_{п} = f(k_{п})$:
I, II, III – зоны, соответствующие воде, двухфазному потоку, притоку безводной нефти; кривые: *1* – $\varepsilon_{вп} = f(k_{п})$; *2* – $\varepsilon_{впп} = f(k_{п})$; *3* – $\varepsilon_{п.кр} = f(k_{п})$; *4* – граница «коллектор – неколлектор»; шифр кривых – $\bar{k}_{в}$

или газом продуктивных коллекторов $\varepsilon_{нп} = f(k_п)$. Пересечение графика $\varepsilon_{вп} = f(k_п)$ с осью ординат дает значение $\varepsilon_{ск}$; абсцисса пересечения графика $\varepsilon_{вп} = f(k_п)$ с линией $\varepsilon_{нп} = f(k_п)$ соответствует значению $k_{п.гр}$ для границы коллектор–неколлектор. Область между графиками *1*, *2* соответствует породам-коллекторам с различным содержанием нефти (газа). Используя коэффициент относительного водонасыщения

$$\bar{k}_в = (k_в - k_{во})/(1 - k_{во}), \qquad (21)$$

где $k_{во}$ – остаточное (неснижаемое) водонасыщение коллектора, можно построить семейство кривых $\varepsilon_п = f(k_п)$ с различными $\bar{k}_в$ = = const. Значение $\bar{k}_в$, характеризующее содержание в породе подвижной воды, изменяется от 0 до 1, от предельно насыщенного до водоносного коллектора. На рис. 44 выделены также области коллекторов, дающих при испытании чистый продукт ($\bar{k}_в$ = 0÷0,3), воду ($\bar{k}_в > 0{,}7$) и нефть (или газ) с водой ($0{,}3 < \bar{k}_в < 0{,}7$).

Петрофизические основы метода диэлектрической проницаемости определяют возможности при решении задач: 1) разделения коллекторов на продуктивные и водоносные при незначительной их глинистости; 2) дифференциации разреза, представленного слабоглинистыми и неглинистыми продуктивными коллекторами, по пористости; 3) литологического расчленения терригенного разреза в его продуктивной или водоносной части по глинистости.

Для исследования разрезов скважин методом диэлектрической проницаемости (ДМ) используют прибор, основными элементами которого являются генераторная катушка Г, создающая электромагнитное поле с частотой в десятки мегагерц, и приемные катушки $П_1$, $П_2$, используемые для измерения модуля напряженности электромагнитного поля h_z и фазы вектора напряженности φ.

Значения h_{z1}, h_{z2} и φ_1, φ_2, измеренные приемными катушками, несут информацию о диэлектрической проницаемости ε и удельном сопротивлении ρ изучаемой среды.

В настоящее время в промышленности используют модификацию ДМ – волновой диэлектрический метод (ВДМ), применяемый в двух вариантах. Аппаратура АДК-1 регистрирует функцию разности фаз $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ поля в точках 1 (φ_1) и 2 (φ_2) – $\cos\Delta\varphi$. Аппаратура ДК1-713 измеряет $\sin(\Delta\varphi/2)$, отношение вертикальных составляющих амплитуд $|h_{z1}|/|h_{z2}|$ и величину $(|h_{z1}| - |h_{z2}|)/|h_{z2}|$ при частоте поля 43 МГц. Все три измеряемые величины зависят от параметров ε и ρ среды; в наименьшей степени зависит от ρ величина $\Delta\varphi$ [2].

Исследования ВДМ проводят в необсаженных скважинах, заполненных РВО с $\rho_р > 0{,}7 \div 0{,}8$ Ом·м или РНО. С увеличением удельного сопротивления промывочной жидкости и пород изучаемого разреза ($\rho_п \gg 5$ Ом·м) эффективность метода возрастает.

В пластах ограниченной толщины формы кривых ВДМ $\cos\Delta\varphi$; $\sin(\Delta\varphi/2)$ и отношения амплитуд симметричны относительно середины пласта, начиная с $h > 0{,}5$ м. Границы пластов выделяют по точкам перегиба кривых (половине аномалии).

Глубинность метода 0,6–0,8 м. Скважина с $d_с = 0{,}3$ м, заполненная пресным раствором ($\rho_р > 0{,}7 \div 0{,}8$ Ом·м), не влияет на результаты измерений. Влиянием скважины с $d_с > 0{,}3$ м при $\rho_р < 0{,}7 \div 0{,}8$ Ом·м можно пренебречь только в разрезе высокого сопротивления. Зона проникновения с $D < 0{,}6 \div 0{,}8$ м ($D = 4d_с$) практически не влияет на показания ВДМ. При $D > 0{,}6 \div 0{,}8$ м зона проникновения влияет на результаты исследований ВДМ тем интенсивнее, чем больше D и чем сильнее различие параметров ε и ρ зоны и неизмененной части пласта. Количественная интерпретация материалов ВДМ с целью определения параметров $\varepsilon_п$ и $\rho_п$ целесообразна в скважинах, пробуренных на РНО, или в скважинах с РВО для объектов с $D < 0{,}6$ м.

Для интерпретации диаграммы $\cos\Delta\varphi$, получаемой аппаратурой АДК-1, используют палетку (рис. 45) для условий, указанных выше. На диаграмме помещают линейную шкалу параметра $\cos\Delta\varphi$, значение которого меняется от 0,8 до –0,8 при изменении ε от 1 (воздух) до 80 (вода) для среды с $\rho = \infty$ (рис. 46). По этой причине на диаграмме обычно не помещают шкалу ε, поскольку $\varepsilon \approx \varepsilon_п$ с некоторым приближением только при $\rho_п > 80$ Ом·м. Поэтому $\varepsilon_п$ определяют в каждом пласте по палетке, представленной на рис. 45. Для этого каким-либо способом (чаще по диаграммам фокусированных зондов) находят величину $\rho_п$ и по точке с координатами $\{\rho_п, \cos\Delta\varphi\}$ определяют искомое $\varepsilon_п$.

Более надежным считается определение $\varepsilon_п$ по диаграммам аппаратуры ДК1-713, поскольку этот зонд дает два уравнения – $\sin(\Delta\varphi/2) = f(\varepsilon, \rho_п)$ и $h_{z_1}/h_{z_2} = f(\varepsilon, \rho_п)$ – для определения двух неизвестных $\varepsilon_п$ и $\rho_п$.

Геологическую интерпретацию диаграмм ВДМ для некоторых ситуаций при решении различных задач рассмотрим на примерах.

Пример 33. В скважине, пробуренной на РНО, исследован терригенный разрез, содержащий газоносные полимиктовые песчаники и алевролиты. При заполнении скважины РНО выполнены исследования индукционным зондом 6Ф1, ВДМ (аппарату-

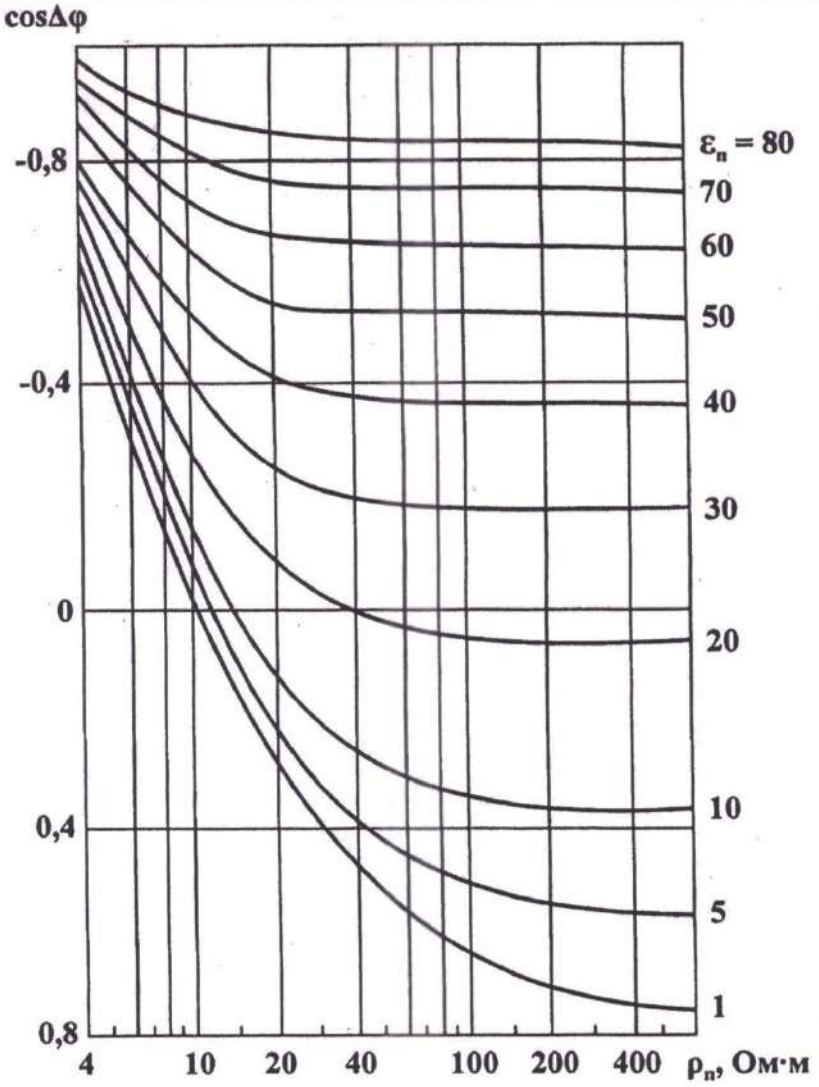


Рис. 45. Палетка для определения $\varepsilon_п$ по данным индукционного зонда аппаратуры АДК-1 (по С.Б. Денисову [13])

рой АДК-1), нейтронными (НГМ, ННМ-Т) и плотностным методами (ГГМ-П). После замены РНО на РВО выполнен стандартный комплекс электрометрии с регистрацией диаграмм БЭЗ, БК, СП.

В этих условиях диаграмма ВДМ, представленная кривой cosΔφ, – прежде всего средство литологического расчленения разреза по глинистости, которая в изучаемых отложениях контролирует способность породы быть коллектором, а для коллекторов является фактором, контролирующим их пористость $k_п$ и объемную влажность $w = k_п k_в$ (см. рис. 46). Наиболее высокие

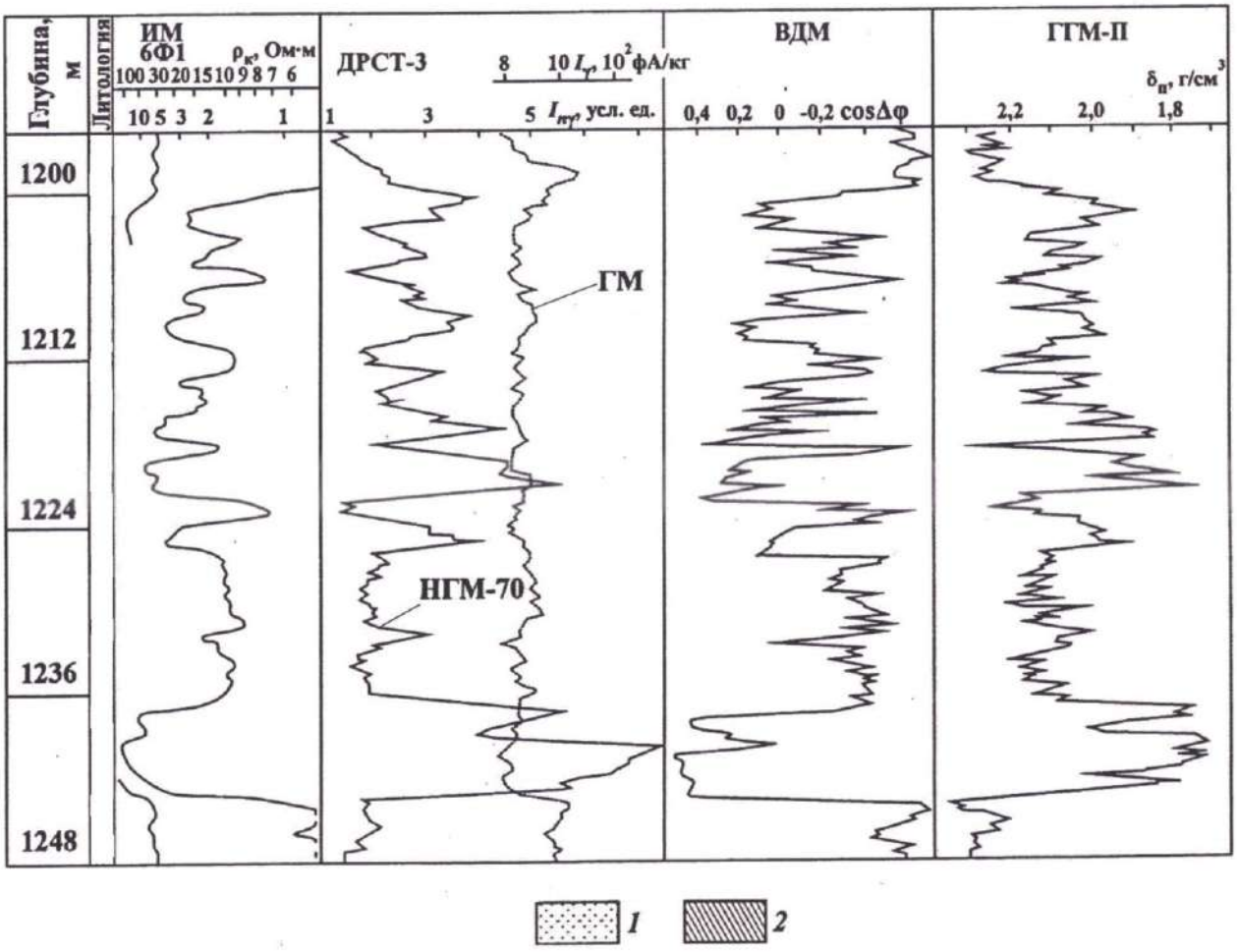
Рис. 46. Пример использования волнового диэлектрического метода для изучения терригенного разреза, вскрытого на РНО:
1 – коллектор; *2* – неколлектор

показания ВДМ (значения $\cos\Delta\varphi$ до –0,6) соответствуют глинам и глинистым алевролитам, значения $\varepsilon_п$ которых достигают 30–40. Низкие показания ВДМ (до значений $\cos\Delta\varphi = 0{,}42 \div 0{,}6$) относятся к наименее глинистым газоносным коллекторам – песчаникам и алевролитам, для которых $\varepsilon_п$ составляет 5–10. Границе коллектор – неколлектор отвечают значения $\cos\Delta\varphi = 0 \div -0{,}1$, а им соответствуют значения $\varepsilon_п$ до 20.

Характерно сходство форм кривых ВДМ и СП, по минимумам которых выделяют в разрезе газоносные коллекторы (при более высокой дифференцирующей способности ВДМ). Расчленяющая способность ГМ в этих условиях значительно уступает таковой у ВДМ и СП, поскольку коллекторы полимиктовые.

53. Оцените пределы изменений величины $\varepsilon_п$ в кварцевом песчанике при насыщении его нефтью и водой, если $k_п = 25$ %, содержание остаточной воды в продуктивном коллекторе $k_{во} = 0{,}1$ а в водоносном коллекторе поры полностью насыщены водой. Используйте $\varepsilon_н = 2$.

Вначале выполнить литологическое расчленение: коллектор – неколлектор


Глубина, м
Литология
ИМ
6Ф1
$\rho_к$, Ом·м
100 30 20 15 10 9 8 7 6
10 5 3 2 1
ДРСТ-3
8 10 I_γ, 10^2 фА/кг
1 3 5 $I_{n\gamma}$, усл. ед.
ВДМ
0,4 0,2 0 -0,2 cosΔφ
ГГМ-П
$\delta_п$, г/см^3
2,2 2,0 1,8
1200
1212
1224
1236
1248
ГМ
НГМ-70
1
2

Пример 34 (рис. 47). В скважине, вскрывшей продуктивный карбонатный разрез с РНО, выполнен комплекс ГИС, в том числе исследования ВДМ. Затем раствор заменен на РВО, после чего выполнен обычный комплекс ГИС, дополненный ВДМ.

Сопоставление кривых ВДМ, полученных при заполнении скважины РНО и после замены РНО на РВО, позволяет определить ВНК на глубине 1870 м. Выше ВНК продуктивные коллекторы отмечаются участками расхождения показаний ВДМ, поскольку при заполнении скважины РНО метод фиксирует низкие значения $\varepsilon_п$ (до 15), характерные для нефтенасыщенных межзерновых коллекторов. После замены на РВО ВДМ, обладая небольшой глубинностью, исследует в коллекторах зону проникновения, при этом значения $\varepsilon_п$ возрастают до 20–30. В неколлекторах и водоносных коллекторах показания ВДМ с РНО и РВО практически совпадают. В водоносной части разреза показания ВДМ контролируются только пористостью.

Об этом говорит сходство кривых ВДМ и интервального времени ΔT акустического метода. В продуктивной части разреза коллектору, выделенному по материалам ВДМ, отвечают значения $k_п$, установленные по ΔT, выше граничного $k_{п.гр} = 6$ %.

Задачи

52. В карбонатном разрезе, представленном известняками, выделен продуктивный коллектор с $k_п = 15$ %. Определите коэффициент нефтенасыщения коллектора, если установленное по диаграмме ВДМ, зарегистрированной при вскрытии разреза на РНО, $\varepsilon_п = 9$. Используйте значение $\varepsilon_и = 2$.

Вначале выполнить литологическое расчленение разреза: коллектор–неколлектор

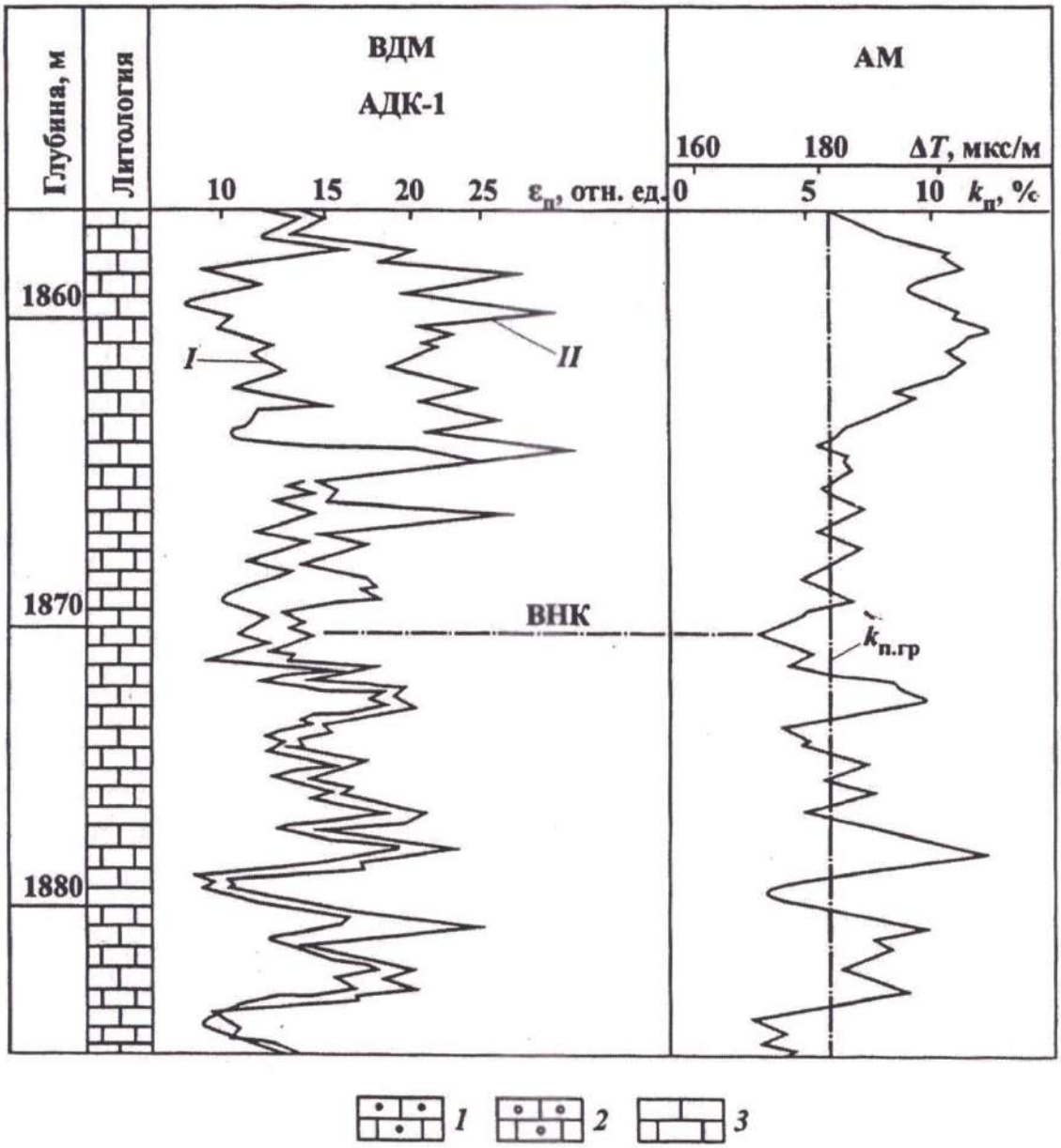


Рис. 47. Пример использования волнового диэлектрического метода для изучения коллекторов в карбонатном разрезе со сменой промывочной жидкости:

I, II – кривые ВДМ, полученные соответственно при заполнении скважины РНО и после замены РНО на РВО; *1* – нефтенасыщенные коллекторы; *2* – водонасыщенные коллекторы; *3* – преимущественно плотные породы

Работа № 6

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАДИОВОЛНОВОГО ПРОСВЕЧИВАНИЯ (РВП)

Метод радиоволнового просвечивания (РВП) применяется для изучения пространства между скважинами или горными выработками [4, 8].

Основан метод на различной степени поглощения энергии электромагнитного поля горными породами.

Поглощение радиоволн в горных породах зависит от электромагнитных параметров горных пород: удельного электрического сопротивления ρ и диэлектрической проницаемости ε и магнитной проницаемости μ. Сильнее всего поглощаются радиоволны в хорошо проводящих рудных телах. При наблюдениях по методу РВП в одной из исследуемых скважин устанавливается приемник радиоизлучения, а по другой перемещается радиопередатчик. Если на пути распространения радиоволн оказывается поглощающий объект, то в исследуемой скважине наблюдается ослабление принимаемого излучения - так называемая радиотень.

Напряженность электрического поля в точке расположения приемника (Е) может быть определена по формуле:

$$E = E_0 \cdot \frac{e^{-\alpha_к r}}{r} \cdot Sin\,\theta_1 \cdot Sin\,\theta \qquad (8)$$

где E - напряженность электрического поля в мкв;

E_0 - амплитудное значение напряженности электрического поля вблизи передатчика, указывается в паспорте прибора (для СРП-7 $E_0 = 100$ в);

r - расстояние между приемником и передатчиком в м;

$\alpha_к$ - кажущийся коэффициент поглощения, который зависит от электрических свойств среды и измеряется в $\frac{неп}{м}$ или $\frac{дб}{м}$ $\left(1\frac{неп}{м} = 8{,}68\frac{дб}{м}\right)$;

$Sin\theta_1, Sin\theta$ - множители направленности, учитывающие взаимную ориентировку антенн приемника и передатчика. При зенитных углах скважин более 70^0 эти множители могут быть опущены.

При интерпретации результатов наблюдений методом РВП

могут быть решены вопросы о местоположении и форме проводящих объектов, а также о распределении их поглощающих свойств. Для интерпретации используются различные способы: засечек, сравнения, лучевой, кажущихся коэффициентов поглощения и обобщенной плоскости наблюдения.

Ниже будет описан лучевой способ интерпретации. Этот способ основан на вычислении коэффициентов экранирования, по которым затем уже определяется местоположение рудных тел.

Обработка и интерпретация материалов проводится в следующем порядке:

1. Выписываются в журнал значения измеренной напряженности электрического поля для точек, расположенных через определенные интервалы (10 м) в исследуемой скважине (той, по которой перемещается передатчик). В дальнейшем эти точки называют точками измерения.

2. Определяются и заносятся в журнал расстояния от этих точек до точки стояния приемника (r).

3. По одной или нескольким точкам, для которых поле можно считать нормальным, определяется кажущийся коэффициент поглощения $\mathcal{L}_к$. Точки, выбранные для этого, должны находиться на большом расстоянии от приемника и иметь повышенные значения E.

Величину коэффициента $\mathcal{L}_к$ можно найти двумя способами:

а) по формуле:

$$\mathcal{L}_к = \frac{lgE_0 - lg(E \cdot r)}{0{,}434 \cdot r} \quad ; \qquad (9)$$

б) по специальным номограммам по горизонтальной оси откладывается расстояние r в м, по вертикальной в логарифмическом масштабе – напряженность электрического поля E в мкВ (рис. 31).

Кривые, нанесенные на этой палетке, отличаются по значению коэффициента поглощения. Найденное значение $\mathcal{L}_к$ принимается постоянным для всего исследуемого пространства.

4. Определяется величина нормального поля для разбитой сети точек. Нормальное поле может быть либо рассчитано по формуле:

$$E_н = E_0 \cdot \frac{e^{-\mathcal{L}_к \cdot r}}{r} \quad , \qquad (10)$$

либо найдено по той же номограмме, что и коэффициент $\mathcal{L}_к$. (Поправкой на взаимную ориентировку антенн можно пренебречь).

5. Подсчитывается коэффициент экранирования $Э = \frac{E_н}{E_{изм.}}$ (43). Если коэффициент поглощения был определен правильно, то коэффициент экранирования всегда получается больше 1.

6. Строится лучевая диаграмма.

Для этого на лучах, соединяющих точки стояния приемника с точками наблюдения, выписываются найденные коэффициенты экранирования.

7. Определяется местоположение рудного тела по пересечению лучей с повышенными коэффициентами экранирования (рис. 32).

8. По вариациям коэффициентов $Э$ в пределах контура рудного тела можно судить об изменениях мощности или электрических свойств объекта.

З А Д А Н И Е

1. Скопировать плоскость разреза исследуемых скважин.

2. Заполнить журнал обработки результатов РВП лучевым способом (таблица № 1).

Таблица № 1

№ п/п	Глубина стояния приемника в м.	Глубина точек измерения (передатчика) в м.	Расстояние от приемника до точки измерения в м.	Измеренная напряженность электрического поля $E_{изм.}$ мкВ	Напряженность нормального электрического поля $E_н$ мкВ	Коэффициент экранирования $Э$	Примечание
1	2	3	4	5	6	7	8
							N скв., в которой находится передатчик. № скв. в которой находится приемник. Найденные значения $\mathcal{L}_к$

3. Построить лучевую диаграмму.

4. Определить местоположение поглощающего объекта.

5. Описать полученные результаты.

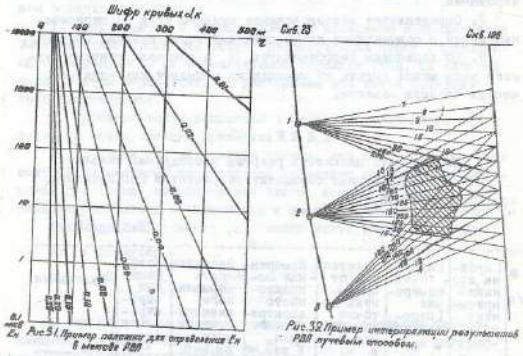


Рис. 31. Пример палетки для определения $E_н$ в методе РВП

Рис. 32. Пример интерпретации результатов РВП лучевым способом.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Временное методическое руководство по методу электрической корреляции (МЭК). Изд. УПГУ, Свердловск, 1964. Авторы: Козырин А.К., Цунтэн В.М., Тарасов А.В. и др.

2. Глубинные поиски полиметаллических и золото-сульфидных руд на основе скважинных геофизических и геохимических методов. (Метод. руководство) Л. "Недра", 1968. Авт.: Зиверт Р.Р., Шатров Ю.В., Рисс Л.С. и др.

3. Комаров В.А. Электроразведка методом вызванной поляризации. Л. "Недра", 1977.

4. Подземная геофизика. М. "Недра", 1973. Авт.: Тархов А.Г., Бондаренко В.М., Коваленко В.Ф. и др.

5. Поляков А.С. Руководство по методу заряда. "Недра", 1969.

6. Родионов П.Ф. Электроразведка методом заряда. "Наука", М., 1971.

7. Саковцев Г.П., Редозубов А.А. Методы скважинной электроразведки при поисках и разведке рудных месторождений. М., "Недра", 1968.

8. Скважинная рудная геофизика. Л., "Недра", 1971.

9. Электромагнитные методы разведки в рудной геофизике. М., "Недра", 1966. Авт.: Светов Б.С., Петровский А.Д., Ершов А.М. и др.

Интерпретация результатов РВП

Вариант II

Глубина стоянки, м		г, м	Еизм, мкВ	Ен, мкВ	Э
Приемн. С-1344	Передат. С-1356				
360	400		480		
	420		480		
	440		495		
	460		380		
	480		310		
	500		290		
	520		170		
	530		100		
	540		6		
	550		5		
	560		50		
	580		80		
	600		40		
	620		20		

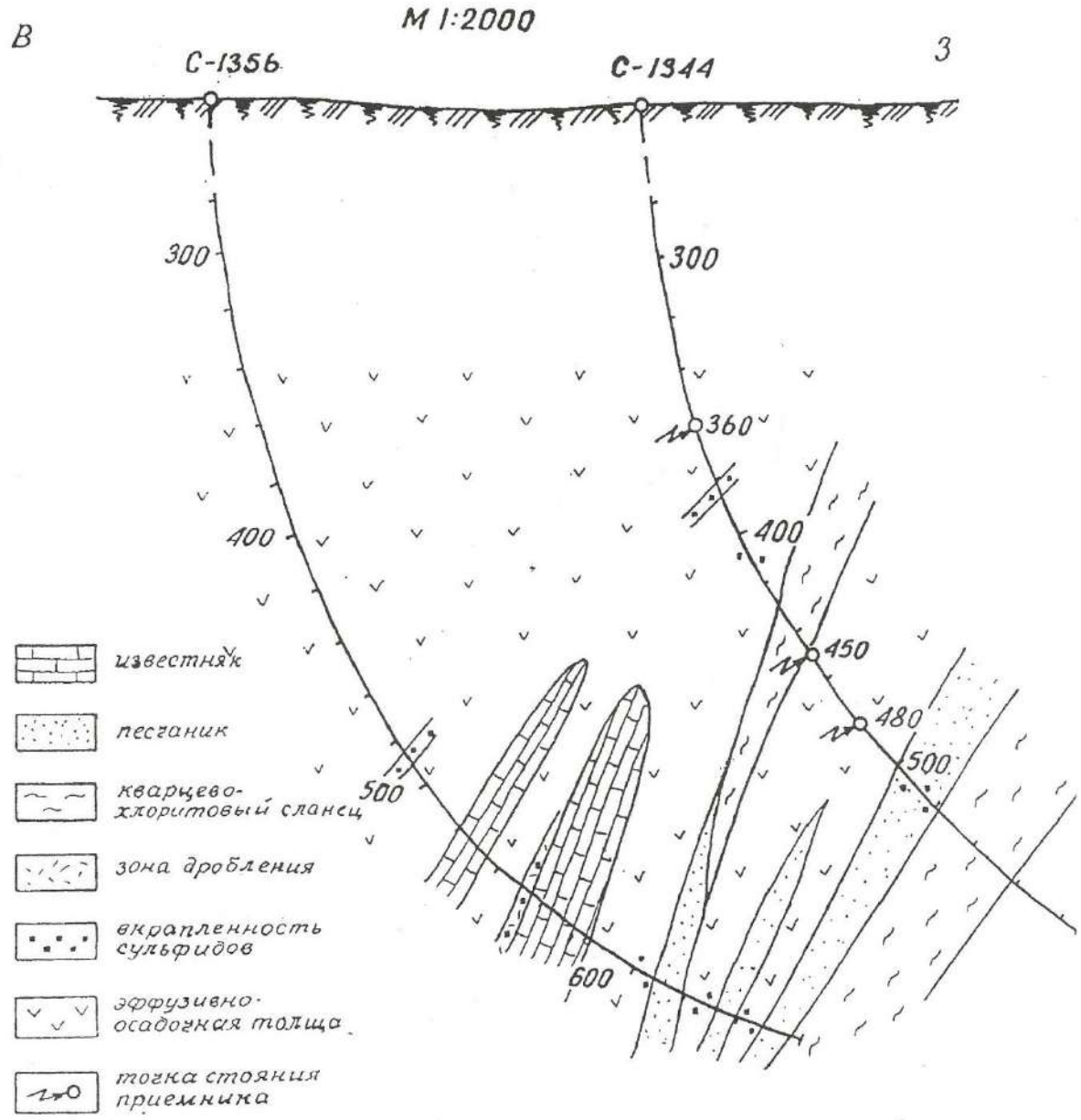
Глубина стоянки, м		г, м	Еизм, мкВ	Ен, мкВ	Э
Приемн. С-1344	Передат. С-1356				
450	420		90		
	440		170		
	450		250		
	160		130		
	470		30		
	480		50		
	490		56		
	500		65		
	510		80		
	520		90		
	530		100		
	540		500		
	550		1400		
	560		1700		
	580		1900		

Глубина стоянки, м		г, м	Еизм, мкВ	Ен, мкВ	Э
Приемн. С-1344	Передат. С-1356				
480	400		12		
	420		30		
	440		30		
	450		10		
	460		11		
	470		14		
	480		20		
	490		25		
	500		30		
	510		40		
	520		50		
	530		400		
	540		1000		
	550		1050		
	560		1500		

Интерпретация результатов РВП

Вариант II Рудный Алтай

М 1:2000



Интерпретация результатов РВП

Вариант I

Глубина стоянки, м		r, м	$E_{изм.}$, мкВ	$E_н$, мкВ	Э
Приемн. С-145	Передат. С-164				
340	300		1000		
	310		980		
	320		920		
	330		210		
	340		20		
	360		16		
	380		17		
	400		12		
	420		47		
	430		176		
	440		120		
	460		75		
	480		42		
	500		2		
	540		0,2		
	580		0		

Глубина стоянки, м		r, м	$E_{изм.}$, мкВ	$E_н$, мкВ	Э
Приемн. С-145	Передат. С-164				
440	280		150		
	300		300		
	310		48		
	320		12		
	340		20		
	360		280		
	380		1200		
	400		1380		
	420		150		
	440		40		
	460		26		
	480		150		
	500		480		
	520		40		
	540		4		
	560		2		
	580		1		
	600		0		

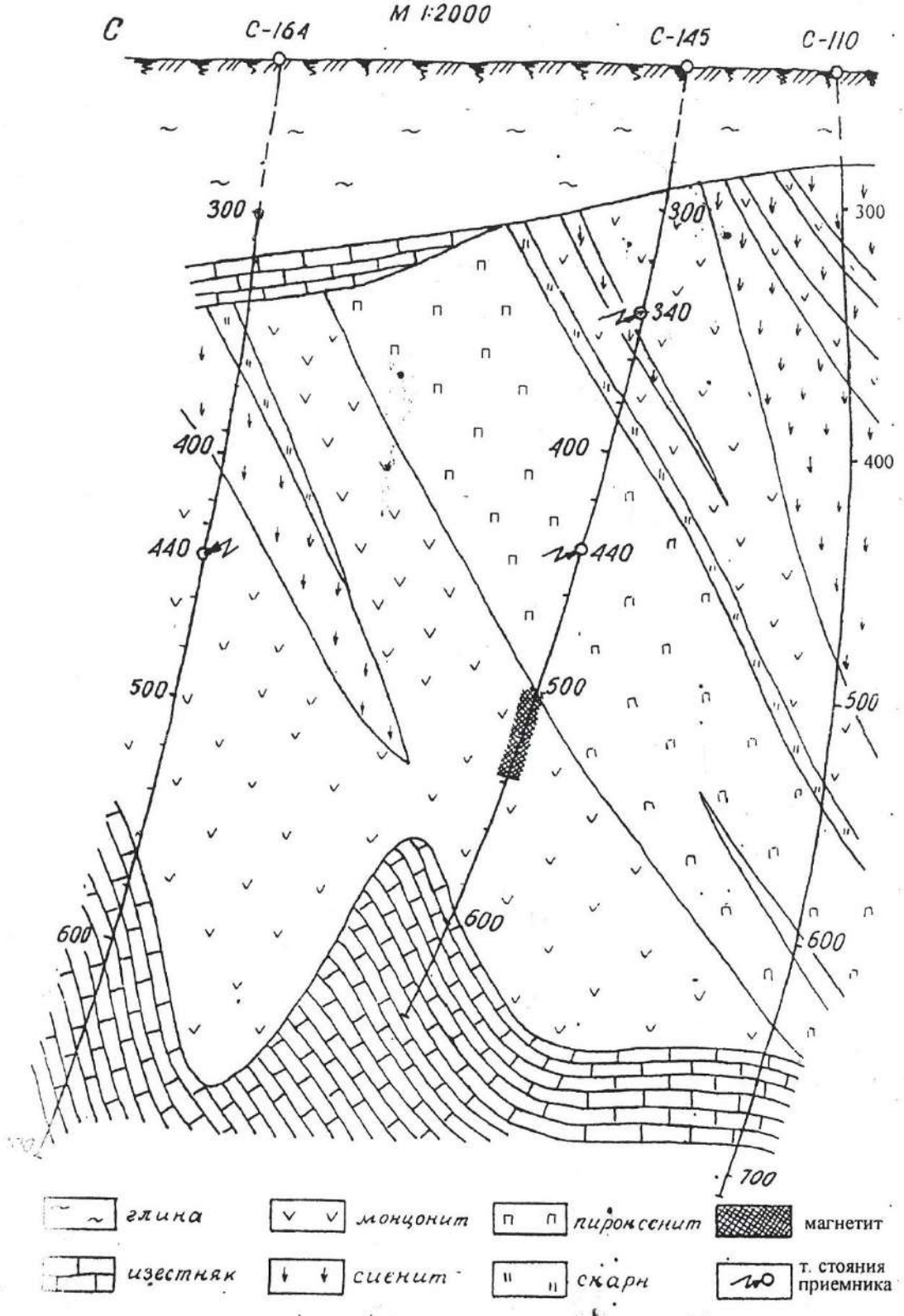
Глубина стоянки, м		r, м	$E_{изм.}$, мкВ	$E_н$, мкВ	Э
Приемн. С-164	Передат. С-145				
440	280		1		
	300		2		
	320		28		
	340		125		
	360		200		
	380		400		
	400		780		
	420		24		
	440		40		
	460		520		
	480		1850		
	500		540		
	520		50		
	540		400		
	560		950		
	580		550		
	600		400		

Интерпретация результатов РВП

Вариант I

Ю. Казахстан

М 1:2000



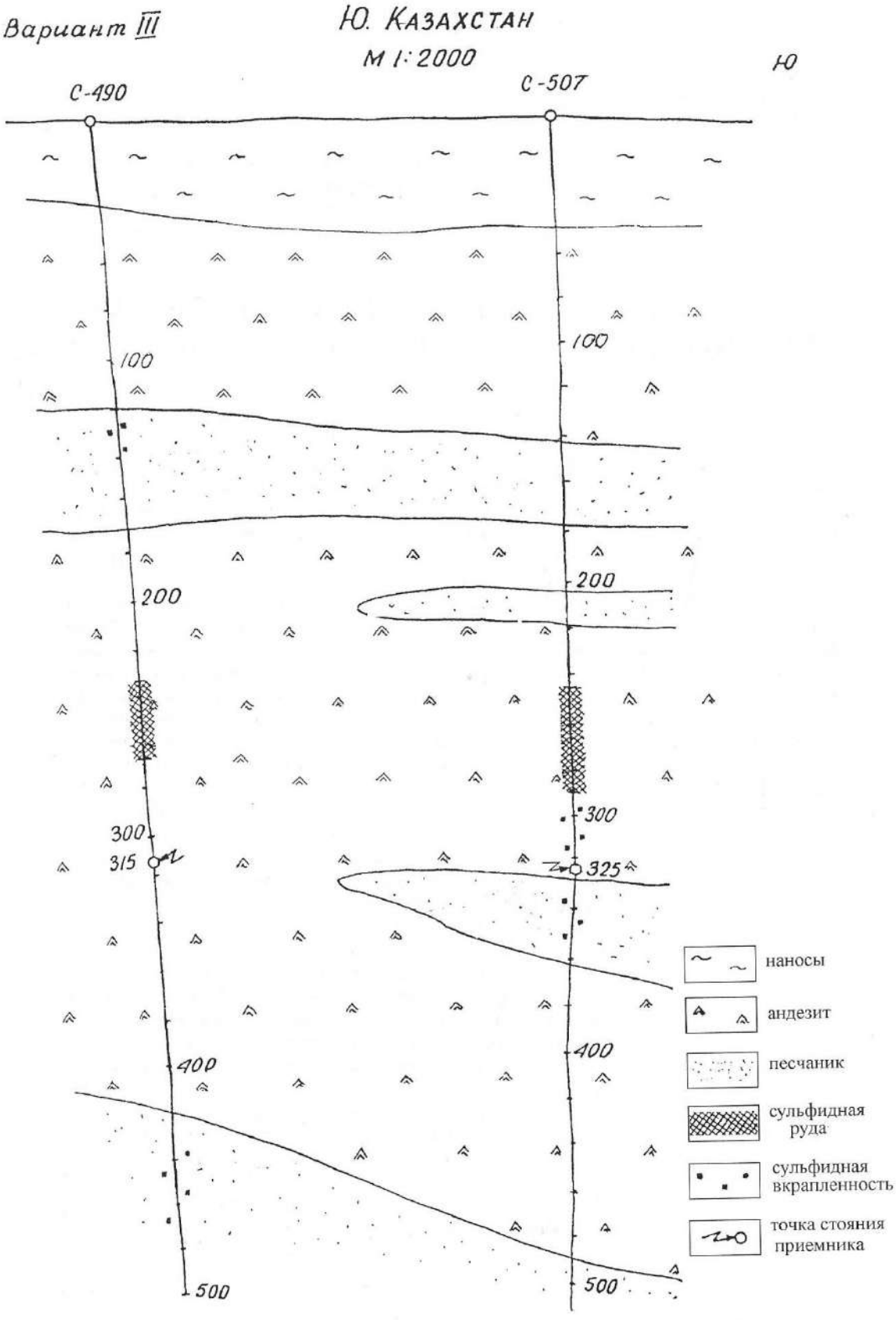
Интерпретация результатов РВП

Вариант III

Глубина стоянки, м		r, м	$E_{изм}$, мкВ	$E_н$, мкВ	Э
Приемн. С-507	Передач. С-490				
325	440		100		
	420		80		
	400		12		
	380		18		
	360		20		
	340		480		
	320		480		
	300		400		
	280		360		
	270		160		
	260		15		
	240		6		
	220		5		
	200		4		
	180		50		
	160		30		
	140		12		
	120		8		
	100		2		
	80		0		
	60		0		

Глубина стоянки, м		r, м	$E_{изм}$, мкВ	$E_н$, мкВ	Э
Приемн. С-507	Передач. С-490				
315	460		60		
	440		90		
	420		7		
	400		10		
	380		16		
	360		21		
	340		490		
	320		520		
	300		470		
	290		400		
	280		28		
	260		25		
	240		15		
	220		12		
	200		10		
	180		87		
	160		36		
	140		28		
	120		12		
	100		6		
	80		0		
	60		0		

Интерпретация результатов РВП



Работа № 14

Анализ и интерпретация результатов скважинных инклинометрических магнитных измерений

В вертикальной инклинометрии измеряются обычно 3 составляющие полного вектора напряженности земного магнитного поля. Измерения производятся с помощью 3-х взаимоперпендикулярных магнитометрических датчиков (ММД), которые ориентированы по основной или вертикальной осями /3,12/.

В аппаратуре ТСИМ-3Э ось одного ММД (Z') направлена по оси скважины, ось другого (X') перпендикулярно ему и лежит в плоскости вертикальной скважины и ось третьего (Y') направлена горизонтально и перпендикулярно двум предыдущим. За положительные направления составляющих Z', X', Y' принимаются такие, которые образуют левую систему координат при направлении z' вниз по скважине (рис.40).

Измерения составляющих производят поточечно при остановках прибора в скважине и результаты измерений заносят в журнал. Инклинометрические измерения должны сопровождаться точными замерами искривления скважины. Обработка результатов заключается в определении величины и направления вектора напряженности аномального магнитного поля $\bar{T}_a$, который представляет собой геометрическую разность полного измеренного вектора $\bar{T}$ и вектора напряженности нормального поля $\bar{T}_0$:

$$\bar{T}_a = \bar{T} - \bar{T}_0 = (X' - X'_0)\bar{i} + (Y' - Y'_0)\bar{j} + (Z' - Z_0)\bar{k}, \quad (23)$$

где $\bar{i}, \bar{j}, \bar{k}$ – единичные векторы-орты;
X'_0, Y'_0, Z'_0 – соответствующие составляющие напряженности нормального поля Земли, измеряемые на контрольном пункте.

Для наглядности и удобства интерпретации результаты трехкомпонентных измерений изображают в виде проекций векторов $\bar{T}_a$ на две вертикальные плоскости: одну параллельную простиранию пород ($\bar{T}_{a\parallel}$), другую – перпендикулярную простиранию ($\bar{T}_{a\perp}$). При этом промежуточные этапы построений также изображаются на том же чертеже в виде нескольких колонок (рис.41).

В первой колонке наносят глубины точек измерения и геологический разрез скважины.

Во второй строят диаграмму Z_a.

в плане.

на поперечный разрез (вкрест простирания) вносят кривую $H_{a\perp}$ – проекций $\bar{H}_a$ на плоскость разреза и $\bar{T}_{a\perp}$ – проекций вектора $\bar{T}_a$ на ту же плоскость.

колонка на продольный разрез (по простиранию) вносят кривую $H_{a\parallel}$ – проекций составляющей $\bar{H}_a$ на плоскость разреза и $\bar{T}_{a\parallel}$ – проекции вектора $\bar{T}_a$ на ту же плоскость.

Аналогично материалов и все построения выполняют для каждой точки наблюдения в следующем порядке.

1. По графикам составляющих нормального поля Земли (рис.42) определяют значения Z_a', X_a', Y_a', соответствующие углам искривления скважины в точке наблюдения. Эти значения заносят в таблицу 9, форма которой приведена в задании.

2. Найденные значения составляющих нормального поля вычитают из соответствующих составляющих напряженности аномального магнитного поля также заносят в таблицу.

3. От составляющих напряженности аномального магнитного поля, найденных для осевой схемы ориентировки датчиков, осуществляют переход к составляющим аномального поля для вертикальной ориентировки, которые также вносятся в таблицу.

$$\begin{aligned} Z_a &= Z_a' \cdot \cos\gamma^0 - X_a' \cdot \sin\gamma^0; \\ X_a &= X_a' \cdot \cos\gamma^0 + Z_a' \cdot \sin\gamma^0; \\ Y_a &= Y_a' \end{aligned} \qquad (24)$$

Здесь γ^0 – это угол искривления скважины.

4. Далее от вычислений переходят к графическим построениям, которые начинают с I колонки чертежа, где выносят глубины точек измерения и геологический разрез скважины, построенный по данным керна и каротажных диаграмм (рис.41).

5. Во II колонке чертежа строят кривую $\bar{X}_a$ с учетом знака этой составляющей.

6. В III колонке чертежа строят вектора $\bar{H}_a$. Для этого в каждой точке наблюдения под углом α (азимутальный угол скважины) к направлению на географический север откладывают положительное значение X_a, под углом 90^0 к нему – составляющую Y_a. Их геометрическая сумма и есть горизонтальная проекция вектора $\bar{T}_a$, т.е. $\bar{H}_a$.

В этой же колонке указывают простирание пород и направление, перпендикулярное к нему, которые нужны для определения проекций $H_{a_{\parallel}}$ и $H_{a_{\perp}}$.

7. Заполняют IУ колонку "Поперечный разрез". В этой колонке строят кривую $H_{a_{\perp}}$. С этой целью в каждой точке измерения откладывают по горизонтали отрезок, равный проекции вектора $\bar{H}_a$ (из предыдущей колонки) на направление, перпендикулярное простиранию. Концы отрезков соединяют плавной линией. Здесь же строят вектора $\bar{T}_{a_{\perp}}$ по величинам Z_a и $H_{a_{\perp}}$, снятым с соответствующих кривых во II и IУ колонках для каждой точки измерения.

8. Аналогичным образом заполняют У колонку "Продольный разрез", где строят кривую $H_{a_{\parallel}}$ и вектора $\bar{T}_{a_{\parallel}}$.

9. С кривых $H_{a_{\perp}}$ и $H_{a_{\parallel}}$ снимают максимальные значения этих величин и откладывают соответственно по простиранию и вкрест простирания пород. Их равнодействующая указывает направление в плане на основные магнитные массы.

Чтобы определить, в каком направлении от скважины находится рудное тело, следует помнить, что сходящийся веер векторов $\bar{T}_a$ (или их проекций $\bar{T}_{a_{\perp}}$ и $\bar{T}_{a_{\parallel}}$) **направлен в сторону верхнего конца** рудного тела; а расходящийся веер $\bar{T}_a$ (или их проекций $\bar{T}_{a_{\perp}}$ и $\bar{T}_{a_{\parallel}}$) **направлен в сторону от нижнего конца** рудной залежи (при отвесном намагничивании).

Следовательно, по распределению векторов $\bar{T}_a$ можно указать направление на рудную залежь; определить, верхний или нижний конец ее располагается около скважины; указать направление падения рудного тела.

ЗАДАНИЕ

I. Занести в таблицу 9 результаты измерений составляющих суммарного магнитного поля и данные инклинометрии.

Таблица 9

№№ пп	Н, м	Инклинометрия, град		Суммарное поле, тыс. нТл			Нормальное поле, тыс. нТл			Аномальное поле, тыс. нТл				
		φ	α	Z'	X'	Y'	Z'_0	X'_0	Y'_0	Z'_a	X'_a	$Y'_a=Y_a$	Z_a	X_a
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15



Рис. 80. Общая схема ориентирования датчиков в скважинном магнитометре

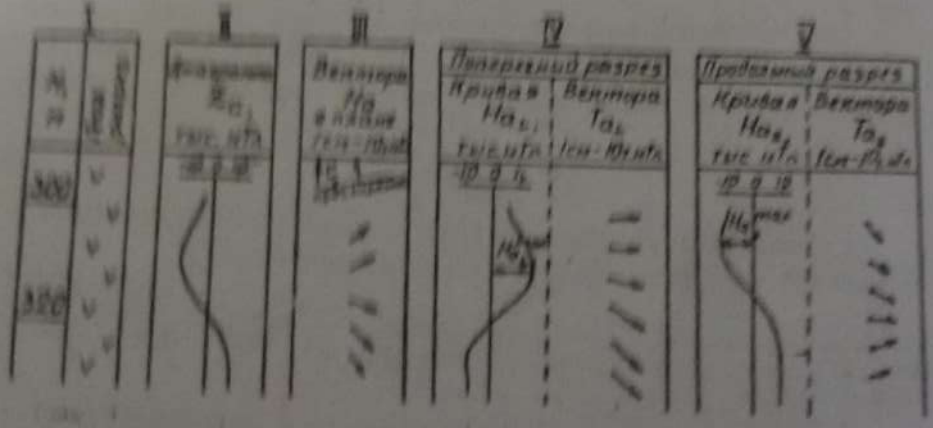


Рис. 81. Пример изображения результатов скважинной трехкомпонентной магниторазведки

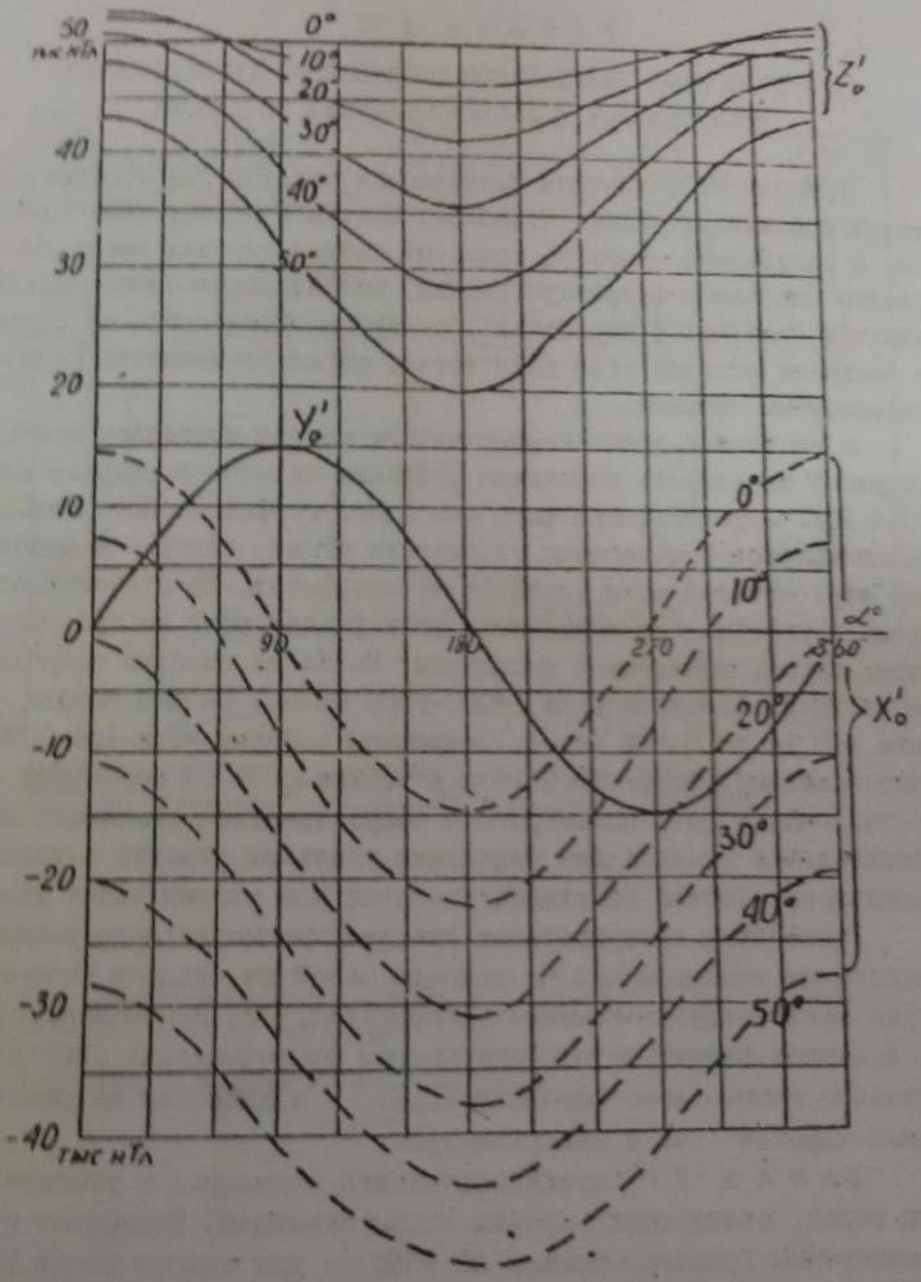


Рис. 42. Графики зависимости составляющих нормального магнитного поля Земли от ориентировки датчиков. Шифр кривых – зенитный угол ϑ, град.

2. Занести в таблицу 9 значения составляющих нормального магнитного поля, снятые с графиков рис.42.

3. Вычислить и занести в таблицу 9 значения составляющих аномального магнитного поля.

4. Построить результаты обработки ТСМ на стандартном листе миллиметровой бумаги (40 х 30 см). Масштаб построений: I см – 5 м; I см – I0 тыс. нТл. Простирание пород считать широтным.

5. Определить, верхней или нижней оконечностью намагниченного рудного тела вызвана аномалия. Указать, на какой глубине, на каком расстоянии и в каком направлении от скважины находится намагниченный объект.

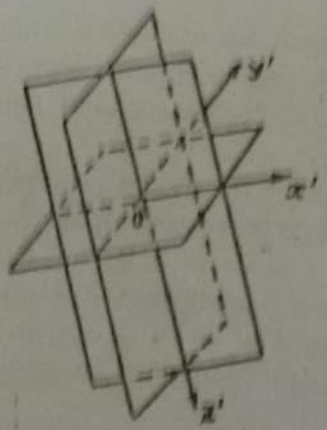


Рис.40. Осевая схема ориентировки датчиков в скважинном магнитометре



Рис.41. Пример изображения результатов скважинной трехкомпонентной магниторазведки

РАБОТА № 5

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИНДУКТИВНОЙ СКВАЖИННОЙ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ

В настоящее время индуктивная электроразведка в скважинах применяется в основном в 2-х вариантах, различающихся по типу источника, возбуждающего первичное поле: в варианте наземной незаземленной петли (ННП) и в варианте дипольного электромагнитного профилирования скважин (ДЭМПС). Интерпретация получаемых результатов будет рассмотрена нами применительно к варианту ДЭМПС, поскольку он применяется гораздо чаще.

В методе ДЭМПС в скважинах измеряются 3 пространственные компоненты аномального магнитного поля, создаваемого вихревыми токами, которые наводятся в подземных проводниках магнитным полем диполя, также расположенного в скважине на фиксированном расстоянии от приемника (рис.19).

Одна компонента (осевая) ориентирована по оси скважины, две других (поперечных) располагаются в плоскости, перпендикулярной оси скважины в точке измерений (рис.20). Одна, называемая вертикальной, лежит в вертикальной плоскости, проходящей через скважину в точке измерения, другая, называемая горизонтальной, расположена горизонтально. За положительные направления компонент приняты: для осевой - вниз по оси скважины, для вертикальной - в направлении искривления скважины, для горизонтальной - направление, повернутое на 90° по часовой стрелке (если смотреть с поверхности) от положительного направления вертикальной компоненты.

Каждая пространственная компонента измеряется по двум её временным составляющим: вещественной ($Re\,H_a$) и мнимой ($Im\,H_a$). Мнимая составляющая отстает по фазе от вещественной на угол $\pi/2$, как это показано на рис.21.

Соотношение между вещественной и мнимой составляющими напряженности аномального магнитного поля при различной частоте первичного поля позволяет судить о проводимости аномального объекта, а совокупность пространственных компо-

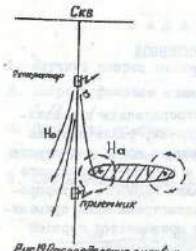


Рис.19. Распределение силовых линий первичного (H_0) и аномального (H_a) магнитных полей.

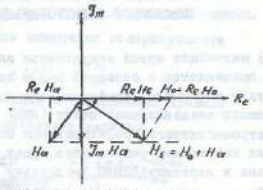


Рис.21. Векторная диаграмма первичного H_0, аномального H_a и суммарного H_c магнитных полей.

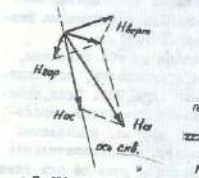


Рис.20. Ориентировка трех пространственных компонент напряженности аномального магнитного поля.

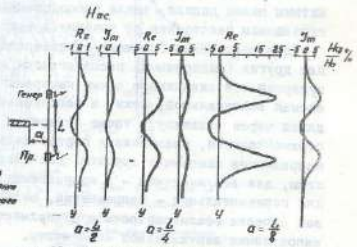


Рис.22. Графики осевой компоненты аномалии от неограниченной пластины при разных расстояниях (a) пластины от скважины.

нент дает возможность построить силовые линии аномального магнитного поля и по ним определить местоположение аномальных объектов [2,8,9].

При интерпретации данных ДЭМПС возможно решение следующих задач.

1. Определение пространственного положения источника аномалии относительно скважины

Определение пространственного положения источника аномалии относительно скважины производится по характеру изменения направления вектора напряженности аномального магнитного поля вдоль скважины.

При этом следует учитывать, что первичное магнитное поле вместе с вихревыми токами образует правовинтовую систему как же, как вихревые токи с силовыми линиями их магнитного поля.

По результатам измерения вертикальной компоненты поля определяют, где находится объект, выше или ниже исследуемого участка скважины. По результатам измерений поперечных составляющих определяют, "слева" или "справа" от плоскости наклона скважины расположен объект для наблюдателя, находящегося на поверхности и смотрящего в сторону наклона скважины.

Так, например, если аномалия горизонтальной составляющей намного превышает аномалию вертикальной составляющей, это означает, что объект располагается сбоку от плоскости искривления скважины. Если вертикальная составляющая намного превышает горизонтальную, значит объект лежит в плоскости скважины и т.п.

Расстояние от скважины до аномального объекта находят по амплитуде аномалии осевой компоненты поля. На рисунке 22 представлены результаты модельных работ, иллюстрирующие зависимость амплитуды аномалий от расстояния между скважиной и кромкой объекта, а на рис.23 - палетка, построенная по этим данным, с помощью которой можно определять это расстояние. Кривые, нанесенные на палетку, различаются по отношению вещественной и мнимой составляющих аномальных поля, т.е., в конечном счете, по проводимости аномальных объектов.

2. Определение размеров проводника

Определение размеров проводящих рудных тел по данным ДЭМПС особенно успешно осуществляется при пересечении скважиной проводящего объекта. Как показывает производственный опыт и результаты исследований на моделях, подсеченный проводник на графике осевой компоненты поля выделяется глубокой отрицательной аномалией (рис.24). При этом если тело имеет размеры во всех направлениях от скважины больше, чем расстояние между генераторной и приемной рамками, аномалия имеет форму широкого минимума (A_{min}). При меньших, хотя бы в одном направлении, размерах тела в эпицентре аномалии намечается горб (A_{max}).

По результатам модельных работ построена номограмма (рис.25), позволяющая оценить размеры подсеченного проводника по отношению $\frac{A_{max}}{A_{min}} = f\left(\frac{L}{2}\right)$.

3. Определение элементов залегания аномальных объектов

Как показывают исследования, выполненные на моделях, при угле встречи скважины и пластообразного рудного тела близком к 90°, аномалия осевой компоненты имеет симметричную форму с двумя одинаковыми максимумами A_1 и A_2, находящимися на расстоянии, равном длине разноса между генераторной и приемной рамками (рис.26).

При уменьшении угла встречи симметрия нарушается и экстремум, расположенный со стороны падения пласта (A_2), возрастает. При остром угле встречи (10°~20°) аномалия представлена одним лишь этим максимумом (A_2).

Составлена палетка, позволяющая по отношению экстремумов A_1 / A_2 определять угол падения пласта (рис.27).

4. Оценка электропроводности аномальных объектов

Оценка электропроводности объектов по данным ДЭМПС косвенно связана с определением их размеров, т.к. аномальный

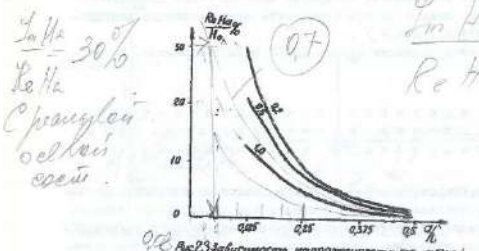


Рис.23. Зависимость напряженности аномального поля от расстояния между скважиной и объектом. Шифр кривых - Jm Ho / Re Ha.

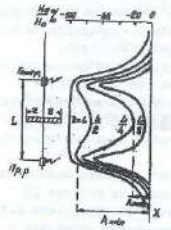


Рис.24. График зависимости осевой компоненты аномалии от длины, пересеченного скважиной, от отношения $\frac{2}{L}$.

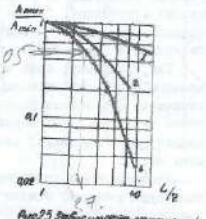


Рис.25. Зависимость аномальных величин отношений от расстояния до ближайшей границы залежи.
1. Полубесконечный пласт.
2. Пласт.
3. Диск.

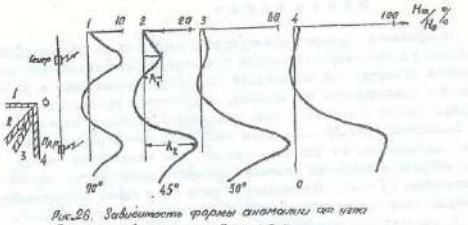


Рис.26. Зависимость формы аномалии от угла встречи скважины и рудного тела.

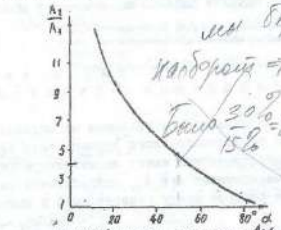


Рис.27. Зависимость отношения A_1/A_2 от угла встречи скважины и рудного тела.

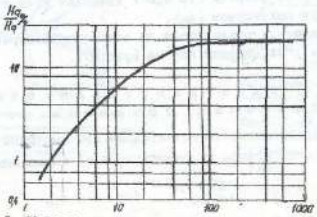


Рис.28. Обобщенная частотная характеристика.

эффект определяется так называемый "индукционным параметром":

$$P = \sqrt{\mu \cdot \gamma \cdot \omega \cdot l}, \qquad (7)$$

где μ – магнитная проницаемость;
γ – электропроводность;
ω – круговая частота возбуждающего поля;
l – характерный размер объекта, измеренный по нормали к его основным поверхностям.

Зависимость аномального эффекта от "индукционного параметра" P называется частотной характеристикой (рис.28). Объекты с малым "индукционным параметром" $P < 1$ (т.е. с низкой электропроводностью) характеризуются в основном аномалиями мнимой составляющей, объекты с $P > 3{\div}5$ (т.е. с хорошей электропроводностью) – в основном аномалиями вещественной составляющей.

От электропроводности (и, следовательно, от P) зависит и фаза аномального поля (φ_a).

Рассчитана номограмма (рис.29), позволяющая по измеренной амплитуде аномального поля $\frac{H_a}{H_0}\%$ и его фазе определить значение индукционного параметра P на каждой конкретной частоте ω.

Из найденного значения P остается исключить частоту и размер аномального объекта l, чтобы определить проводимость:

$$\gamma = \frac{P^2}{\mu \omega l^2}.$$

Значение l можно найти одним из описанных выше способов, или задаться им, исходя из геологических соображений, а μ можно принять равным 1.

Грубо оценить электропроводность объекта можно просто по соотношению вещественной и мнимой составляющих аномального поля: чем больше вещественная составляющая, тем выше электропроводность.

В общем случае интерпретация результатов индуктивной электроразведки носит полуколичественный характер.

ПОРЯДОК ИНТЕРПРЕТАЦИИ

Интерпретация выполняется в порядке, описанном ниже:

1. Сначала определяется местоположение проводящего объекта относительно скважины.

Для этого в горизонтальной плоскости строится геометрическая сумма горизонтальной компоненты аномального поля и проекции вертикальной компоненты на горизонтальную плоскость. Полученный вектор указывает направление на аномальный объект.

Расстояние от скважины до объекта оценивается по номограмме рис.23 в зависимости от интенсивности аномалии.

2. Далее производится оценка размеров аномального объекта. В случае пересечения скважиной рудного тела, для этой цели можно воспользоваться номограммой рис.25. Для неподсеченного проводника представление о его размерах можно получить по изменению аномалии с увеличением разноса: для крупных тел аномалия растет с увеличением разноса, для мелких – падает. Обязательно следует использовать геологические данные.

3. Определяются углы падения аномальных объектов по виду аномалий осевой компоненты (номограмма рис.27).

4. Оценивается электропроводность аномальных объектов по найденным величинам индукционного параметра P и размерам объекта l.

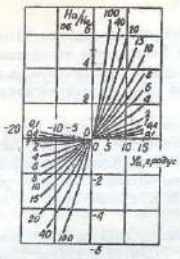
Для примера рассмотрим интерпретацию результатов ДЭМПС, представленных на рис.30.

Скважина 1250 до глубины 240 м проходит по альбитофирам, имеющим сопротивление порядка 10.000 ом.м. От 240 до 340 м скважина пересекает зону кварцево-хлоритовых пород с сопротивлением от 20 до 200 ом.м. Ниже залегают порфириты и их туфы (сопротивление свыше 1.000 ом.м). Руду скважина не встретила, хотя к юго-западу от нее на глубине располагается извеская линзообразная залежь медного колчедана.

По геологическим данным расстояние от скважины до рудного тела составляет 50-60 м.

Результаты ДЭМПС по скважине 1250 представлены в виде графиков вещественной и мнимой составляющих осевой и поперечных компонент аномального поля, выраженных в процентах от величины осевой компоненты первичного магнитного поля.

Представлены результаты измерений поперечных компонент на частоте 125 гц при разносе L =75 м. и осевой компоненты на частоте 125 гц с разносами 25,50,75 и 100 м и на час-



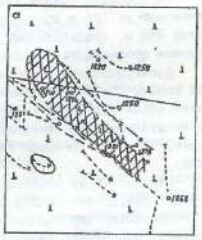


Рис.29. Номограммы для определения индукционного параметра P. (Шифр кривых-P)

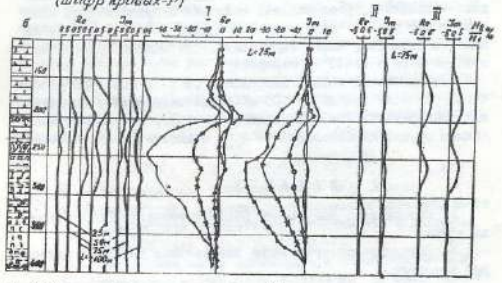
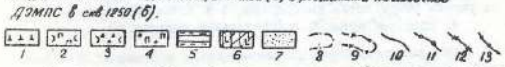


Рис.30. План колчеданного месторождения (а) и результаты наблюдений ДЭМПС в скв 1250 (б).



1-альбитофиры эпидотизированные; 2-туфы порфиритов; 3-порфириты эпидотизированные; 4-сланцы кварцево-серицитовые; 5-кварцево-хлоритовые породы; 6-зоны колчеданных оруденений; 7-тектонические нарушения; 8-контуры рудных тел по геологическим данным; 9-тоже по результатам измерений в АСГМ (1,24, 10 гц; 11-375; 12-1125; 13-3375 Г-осевой, П-горизонтальной, В-вертикальной составляющие.

тотах 125,375, 1125, и 3375 гц при том же разносе 75 м.

На графиках осевой компоненты фиксируется отчетливая аномалия до 10% в виде двух максимумов с эпицентром на глубине 240 м, следовательно, на этой глубине располагается и кромка проводящего объекта.

Далее, аномалия на горизонтальной составляющей значительно больше (5-6%), чем на вертикальной. Это означает, что рудная залежь находится сбоку от плоскости наклона скважины, а положительный знак аномалии горизонтальной компоненты указывает, что располагается "слева", т.е. к юго-западу от скважины.

Расстояние от объекта до скважины, найденное по номограмме рис.23 составляет примерно 0,2-0,25 L , т.е. 15-18 м.

Поскольку верхний максимум на аномалии осевой компоненты больше, чем нижний, можно заключить, что рудная залежь падает к скважине, угол встречи скважины и рудного тела (по номограмме рис.27) находится в пределах 70°. С учетом угла наклона скважины, можно определить, что падение рудной залежи пологое - 35-40° к горизонту.

Рост аномалии осевой компоненты (с 2 до 13%) при увеличении разносов (от 25 до 100 м) свидетельствует о внушительных размерах объекта, создающего аномалию. По геологическим данным ширина линзы около 200 м и мощность (l) около 20м.

З А Д А Н И Е

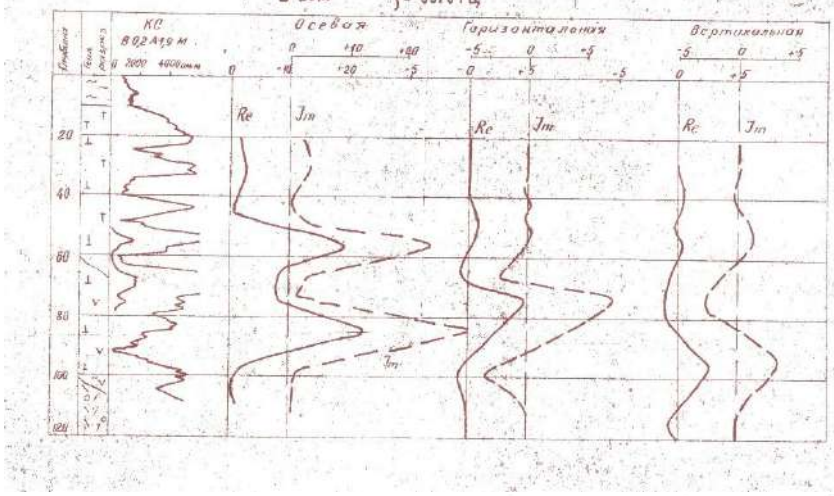
1. Скопировать результаты ДЭМПС и геологический разрез на кальку.
2. Выполнить интерпретацию результатов ДЭМПС по описанной методике.
3. Провести контур рудного тела в исследуемом разрезе с учетом результатов интерпретации и данных бурения.
4. Написать краткую пояснительную записку.

Работа N

Вариант I

Результаты ДЭМПС по скважине N7

L=25м f_0 = 3375 гц



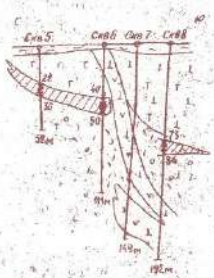


Рис. 1. Геологический разрез (I в.)

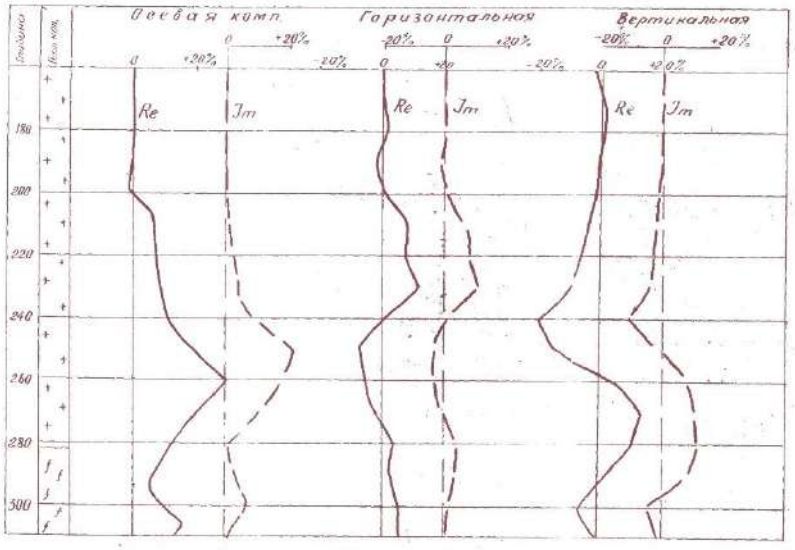
- Порфиры.
- Андезиты.
- Диабазы.
- Туфы смешанного состава.
- Брекчии вулканические.
- Рудное тело.

Работа N

Вариант II

Результаты ДЭМПС, скв. N56.

L = 50м, f_0 = 375 гц.



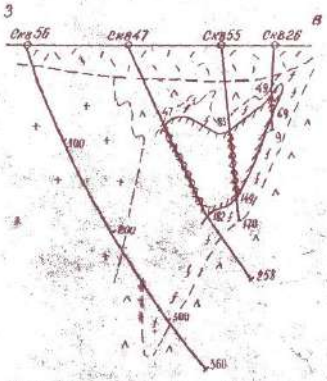


Рис. 1. Геологический разрез (II вариант)

- Кора выветривания;
- Гранодиориты;
- Диабазовый порфирит;
- Кварцево-карбонатные породы;
- Рудные подсечения.

Работа № 1

Расчет длины зонда для акустического каротажа на головных волнах

При акустическом каротаже в скважине и окружающих скважину горных породах возбуждаются упругие волны нескольких различных типов.

Прежде всего, излучатель возбуждает в скважинной жидкости прямую гидроволну, которая распространяется во все стороны от излучателя со скоростью V_{p0} продольной волны, характерной для воды или бурового раствора (поперечные волны в жидкостях не распространяется). С помощью центрирующих устройств излучатель, так же как и приемник, размещаются по оси скважины, таким образом, от излучателя до приемника (или приемников) прямая гидроволна распространяется по кольцевому зазору Δr между стенкой скважины и стенкой скважинного прибора. При уменьшении зазора Δr, т.е. при $\lambda/\Delta r>1$ это волна вырождается.

Ниже корпуса скважинного прибора, объем пространства, по которому может распространяться гидроволна, увеличивается и эта волна преобразуется в трубную волну или волну Лэмба (L). Трубная волна характерна только для цилиндрических полостей, заполненных жидкостью, она имеет плоский фронт перпендикулярный оси скважины. Скорость трубной волны (*Ивакин Б. Н. и др., 1978*):

$$V_m = V_{P0}\sqrt{1+\frac{\rho_0 V_{P0}^2}{\rho_1 V_{S1}}}$$

где ρ_0 и ρ_1 – плотности жидкости и стенки скважины, т.е. горной породы, соответственно. Трубная волна без ослабления может распространяться на большие расстояния. Амплитуда ее убывает только на тех интервалах скважины, где скважина пересекает пласты-коллекторы. В этих интервалах энергия трубной волны расходуется на возбуждение колебаний во флюидах, заполняющих поры и трещины коллекторов.

Дойдя до стенок скважины, гидроволна P_0 возбуждает в горных породах проходящие преломленные волны: продольную P_0P_1 и поперечную P_0S_1, скорость которых зависит от минерального состава пород, их структурно-текстурных особенностей, а также от давления под которым эти породы находятся. Углы преломления как продольной, так и поперечной волны определяются законом Снеллиуса:

$$\frac{V_{P0}}{V_{P0P1}}=\frac{sin\,\gamma_0}{sin\,\gamma_{1P}} \quad \text{и} \quad \frac{V_{P0}}{V_{P0S1}}=\frac{sin\,\gamma_0}{sin\,\gamma_{1S}}$$ (см. рис. 1)

Когда угол падения прямой волны на стенку скважины γ_0 достигает величины критического угла $\gamma_{0P\text{кр}}$, угол преломления продольной волны P_0P_1 становится равным 90^0, и эта волна начинает скользить вдоль стенки скважины. Несколько дальше от излучателя угол падения становится равным критическому для поперечной волны $\gamma_0=\gamma_{0S\text{кр}}$, и преломленная поперечная волна также превращается в скользящую. Колебания частиц породы на стенках скважины передаются буровому раствору и через него достигают приемника П в виде волн $P_0P_1P_0$ и $P_0S_1P_0$. Эти волны называются головными и несут информацию об упругих свойствах горных пород, слагающих стенки скважины. При этом волна $P_0P_1P_0$ называется головной монотипной, а волна $P_0S_1P_0$. – головной обменной, т. к. в ней дважды происходит обмен энергии между продольными и поперечными колебаниями.

Головные волны обладают всеми теми же характеристиками, что и P и S волны в неограниченной среде (*Козяр В. Ф. и др., 2000*).

Кроме перечисленных волн, в скважинах могут существовать еще несколько типов поверхностных волн: Рэлея (R), Стоунли (St) и Лява.

Волна Релея распространяется вдоль границы твердого тела с разряженным пространством (вакуумом, газом, жидкостью). Энергия волны Рэлея сосредоточена в поверхностном слое твердого тела, толщина которого близка к длине волны R. Колебания частиц среды в волне Рэлея совершаются в плоскости, перпендикулярной плоскости раздела. Движение частиц среды в волне R происходит по эллиптической орбите, причем амплитуда колебаний и отношение длины осей эллипса изменяются по мере удаления от границы раздела (рис. 2). Интенсивность ее быстро убывает с удалением от границы, а скорость $V_R \approx 0{,}9V_S$.

Волна Стоунли также как волна Рэлея имеет вертикальную поляризацию – частицы среды перемещаются в плоскости, перпендикулярной плоскости раздела сред. Энергия волны St локализована в основном, в жидкости. Скорость волны Стоунли меньше скорости упругих волн в обеих контактирующих средах $V_{St} < V_{P0}; V_S; V_P$.

Волна Лява распространяется вдоль границ твердого полупространства с твердым слоем (например, на границе горных пород с слоем цементного камня в хорошо зацементированной скважине). Частицы среды в волне Лява перемещаются в плоскости раздела двух сред. Если толщина слоя стремится к нулю, скорость волны стремится к скорости V_S в неограниченно пространстве.

Все три типа поверхностных волн регистрируются в скважине не одновременно из-за разных условий их образования.

В скважинах с открытым стволом волны Лява не регистрируются.

При конструировании зондов АК следует стремиться к тому, чтобы к приемнику одновременно не приходили волны разных типов, иначе, вследствие их интерференции, будет сложно разобраться с волновой картиной.

В частности, при каротаже на головных волнах необходимо выбрать такую длину зонда L (расстояние от измерителя до ближайшего приемника), чтобы прямая волна, распространяющаяся в жидкости – P_0 достигла приемника после прихода головной обменной волны $P_0S_1P_0$. При этом нужно учитывать, что эти волны различаются не только по скорости их распространения, но и приходят к приемнику по разным траекториям (см. рис. 1).

Так, время, затраченное прямой волной на пути И-П по скважине, должно быть равно:

$t_ж = \frac{L}{V_ж}$, где L – длина зонда.

Время, затраченное обменной головной волной, будет складываться из следующих временных разрезов:

$t_п = \frac{2c}{V_ж} + \frac{l}{V_п}$, где $V_ж$ - скорость распространения волны в скважинной жидкости, а $V_п$ – скорость поперечной волны в породе.

При этом выполняется неравенство:

$$t_ж > t_п \text{ или } \quad \frac{L}{V_{жс}} > \frac{2c}{V_{жс}} + \frac{l}{V_п} \qquad (*)$$

Как следует из рис. 1, $l = L - 2b$, где $b = a \cdot tg\gamma_{0Sкр}$; $c = \frac{a}{sin\,\gamma_{0Sкр}}$; $a = r_{скв} - r_{сп}$.

Поскольку обменная головная волна в скважине образуется при угле падения прямой волны ($V_ж$) равном $\gamma_{0Sкр}$, то пользуясь законом Снеллиуса, можно выразить тригонометрические функции sin, cos, tg через скорости волн в жидкости и в породе.

$$sin\,\gamma_{0Sкр} = \frac{V_ж}{V_п};\ cos\,\gamma_{0Sкр} = \sqrt{1 - \left(\frac{V_ж}{V_п}\right)^2};\quad tg\,\gamma_{0Sкр} = \frac{sin\,\gamma_{0Sкр}}{cos\,\gamma_{0Sкр}} = \frac{V_ж}{V_п\sqrt{1-\left(\frac{V_ж}{V_п}\right)^2}}$$

Тогда отрезки b, c и l будут равны:

$$b = atg\gamma_{0Sкр} = a\,\frac{V_ж}{V_п\sqrt{1-\left(\frac{V_ж}{V_п}\right)^2}};\ c = \frac{a}{sin\,\gamma_{0Sкр}} = \frac{a}{\sqrt{1-\left(\frac{V_ж}{V_п}\right)^2}};$$

$$l = L - 2b = L - 2a\,\frac{V_ж}{V_п\sqrt{1-\left(\frac{V_ж}{V_п}\right)^2}}$$

Неравенство (*) примет вид:

$$\frac{L}{V_ж} > \frac{2a}{V_ж\sqrt{1-\left(\frac{V_ж}{V_п}\right)^2}} + \frac{L}{V_п} - \frac{2aV_ж}{V_п^2\sqrt{1-\left(\frac{V_ж}{V_п}\right)^2}};$$

$$\frac{L}{V_ж} - \frac{L}{V_п} > \frac{2a}{V_ж}\left(\frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{V_ж}{V_п}\right)^2}} - \frac{V_ж^2}{V_п^2\sqrt{1-\left(\frac{V_ж}{V_п}\right)^2}}\right).$$

В выражении в круглых скобках в левой части неравенства вынесем за скобку $\frac{1}{V_п^2}$. Получим:

$$\left(\frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{V_ж}{V_п}\right)^2}} - \frac{V_ж^2}{V_п^2\sqrt{1-\left(\frac{V_ж}{V_п}\right)^2}}\right) = \frac{1}{V_п^2}\left(\frac{V_п^2}{\sqrt{1-\left(\frac{V_ж}{V_п}\right)^2}} - \frac{V_ж^2}{\sqrt{1-\left(\frac{V_ж}{V_п}\right)^2}}\right) = \frac{1}{V_п^2}\cdot\frac{V_п^2 - V_ж^2}{\sqrt{1-\left(\frac{V_ж}{V_п}\right)^2}};$$

$$L \cdot \frac{V_п - V_ж}{V_п V_ж} > \frac{2a}{V_ж V_п^2} \cdot \frac{V_п^2 - V_ж^2}{\sqrt{1-\left(\frac{V_ж}{V_п}\right)^2}}.$$

Преобразуем правую часть неравенства:

$$\frac{2a}{V_ж V_п^2} \cdot \frac{V_п^2 - V_ж^2}{\sqrt{1-\left(\frac{V_ж}{V_п}\right)^2}} = \frac{2a}{V_ж} \cdot \frac{(1-\frac{V_ж^2}{V_п^2})}{\sqrt{1-\left(\frac{V_ж}{V_п}\right)^2}} = \frac{2a}{V_ж}\sqrt{1-\left(\frac{V_ж}{V_п}\right)^2}.$$

В итоге получаем:

$$L \cdot \frac{V_п - V_ж}{V_п \cdot V_ж} > \frac{2a}{V_ж}\sqrt{1-\left(\frac{V_ж}{V_п}\right)^2}, \text{ поделим обе части на } \frac{V_п - V_ж}{V_п}$$

$$L > \frac{2aV_п}{V_п - V_ж}\sqrt{1-\left(\frac{V_ж}{V_п}\right)^2}$$

Упростим правую часть неравенства еще раз:

$$\frac{2aV_п}{V_п - V_ж}\sqrt{1-\left(\frac{V_ж}{V_п}\right)^2} = \frac{2aV_п}{V_п - V_ж}\sqrt{1-\frac{V_ж^2}{V_п^2}} = \frac{2aV_п}{V_п - V_ж} \cdot \frac{\sqrt{V_п^2 - V_ж^2}}{V_п} =$$

$$= 2a \cdot \frac{\sqrt{V_п^2 - V_ж^2}}{V_п - V_ж} = 2a \cdot \frac{\sqrt{(V_п - V_ж)(V_п + V_ж)}}{\sqrt{(V_п - V_ж)} \cdot \sqrt{(V_п - V_ж)}} = 2a\sqrt{\frac{V_п + V_ж}{V_п - V_ж}}.$$

В итоге получаем условие, которому должна удовлетворять длина акустического зонда:

$$L > 2a\sqrt{\frac{V_п + V_ж}{V_п - V_ж}}$$

Напомним, что L это расстояние от источника упругих колебаний до ближайшего приемника, $V_п$ - скорость поперечных волн в породах, слагающих стенку скважины, а $V_ж$ – скорость распространения продольных колебаний в скважинной жидкости.

ЗАДАНИЕ

Рассчитать длину зонда АК для условий, заданных преподавателем.

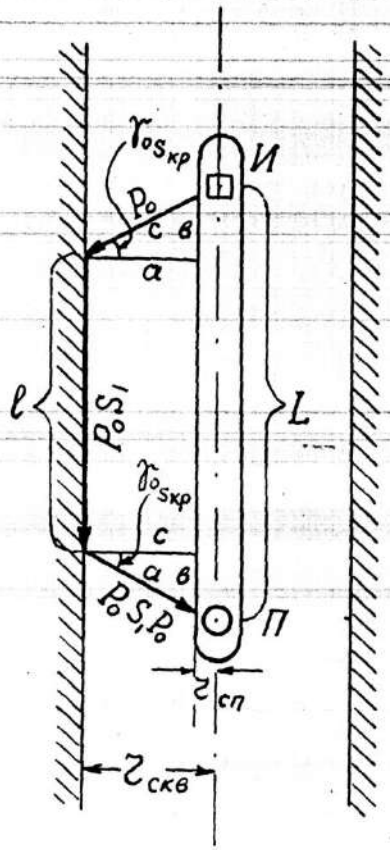


Рис. 1. К расчету длины зонда для акустического каротажа на головных волнах

Задание к работе „Расчет длины зонда АК"

параметр	I вар	II вар	III вар
$d_{скв}$, мм	236	220	127
$d_{сп}$, мм	76	120	40
Скорость УВ в породах, км/с	3,2 - 7,1	3-4	3,5-5
Длина зонда L, м			

Работа № 2

Интерпретация результатов акустического каротажа (АК) на головных волнах

При каротаже на головных волнах используются 3-х элементные зонды АК, состоящие из 2-х приемников и 1 излучателя или, наоборот, 2-х излучателей и 1 приемника. *Расстояние между одноименными элементами называется базой зонда и обозначается* ΔL, *результаты измерений относятся к середине базы (т. О).*

В процессе каротажа регистрируются в виде непрерывных диаграмм кинематические (T_1, T_2, ΔT) и динамические (A_1, A_2, α) параметры монотипных и обменных головных волн, а также динамические параметры волны Лэмба (A_{1L}, A_{2L}, α_L). Кроме того, записываются с определенным шагом по глубине полные волновые картины (ВК) и фазокорреляционные диаграммы (ФКД).

При интерпретации используются все эти материалы в комплексе с диаграммами др. методов ГИС, что позволяет выполнить литологическое расчленение разрезов скважин, выделить пласты-коллекторы, определить их мощность, пористость и характер насыщения пор. Для количественной интерпретации наиболее важными из результатов АК являются диаграмма интервального времени ($\Delta T_P = \frac{1}{V_P}$) и диаграмма коэффициента затухания

$$\alpha = \frac{1}{\Delta L} 20 \frac{lg A_1}{A_2}, \frac{дБ}{м} \quad \text{или} \quad \alpha = \frac{1}{\Delta L} \frac{A_1}{A_2}, \frac{1}{м} \qquad (1)$$

Литологическое расчленение разрезов скважин по результатам акустического каротажа основано на наличии связи между вещественным составом горных пород и их акустическими свойствами – скоростью распространением упругих волн V (или интервальным временем ($\Delta T = \frac{1}{V}$) и коэффициентом поглощения α.

Среди однородных и плотных осадочных пород наиболее высокие скорости продольных волн характерны для доломитов (V_P = 4 – 7,1 км/с), средние – для известняков (V_P = 5,7 – 6,3 км/с), более низкие – для некоторых хемогенных пород (V_P = 4,2 – 4,7 км/с). Более детально скорости продольных волн приведены в табл. 1. Коэффициенты затухания для всех перечисленных пород меняются в одинаковых пределах $\alpha_P = 0{,}2 \div 0{,}3 \frac{1}{м}$.

Таблица 1

Скорости распространения продольных волн V_P и интервальные времена ΔT_P в различных средах и горных породах (по Горбачеву Ю. И., 1990)

Горная порода, среда	V_P, км/с	$\Delta T_\rho = \frac{1}{V_P}$, мкс/м
Глина	2-3,3	300-500
Песчаник	3-5,7	175-333
Известняк	2,6-6,3	159-385
Доломит	4-7,1	141-250
Каменная соль	4,2-4,8	208-238
Кристаллические породы	4,5-6,5	154-222
Ископаемый уголь	1,9-2,9	340-525
Цементный камень	2,5-3,5	286-400
Сталь	5,2-5,7	175-192
Воздух	0,33	3030
Нефть	1,3-1,4	714-770
Вода	1,5	667
Буровой раствор	1,5-1,7	588-667

С ростом объемов пустотного пространства в породах, скорость продольных волн в них может уменьшаться до 2,6-4,0 км/с (V_P), а коэффициент поглощения – возрастать до 0,3-0,7 $\frac{1}{м}$.

Наименьшие значения V_P = 0,6-0,8 $\frac{км}{с}$ и максимальные для коэффициентов поглощения $\alpha_P \approx 3\ \frac{1}{м}$ характерны для рыхлых отложений верхней части разреза (ВЧР).

Таким образом, различия в значениях V_P (или ΔT_P) и α_P могут служить достаточно надежным основанием для литологического расчленения только при одинаковой пористости различных отложений (Стрельченко В. В., 2008). Если пористость не постоянна, то для достоверного литологического расчленения разреза необходимо привлечение, по крайней мере, хотя бы еще одного метода каротажа, чувствительного к пористости отложений. Таким методом может служить нейтронный (НГК) или плотностной каротаж (ГГК-П).

Дополнение акустического каротажа методом НГК или ГГК-П позволяет одновременно решить сразу 2 задачи: определение литологической принадлежности коллектора и определение его пористости.

Для упрощения решения первой задачи разработаны специальные номограммы, одна из которых приведена на рис. 1.

Определение контактов и мощностей пластов выполняется по диаграммам интервального времени (или скорости) упругих волн. Как показано на рис. 2, при равенстве упругих свойств подстилающих и перекрывающих пород пласты с отличающимися упругими свойствами выделяются простыми, симметричными относительно середины пласта аномалиями ΔT (или V). При

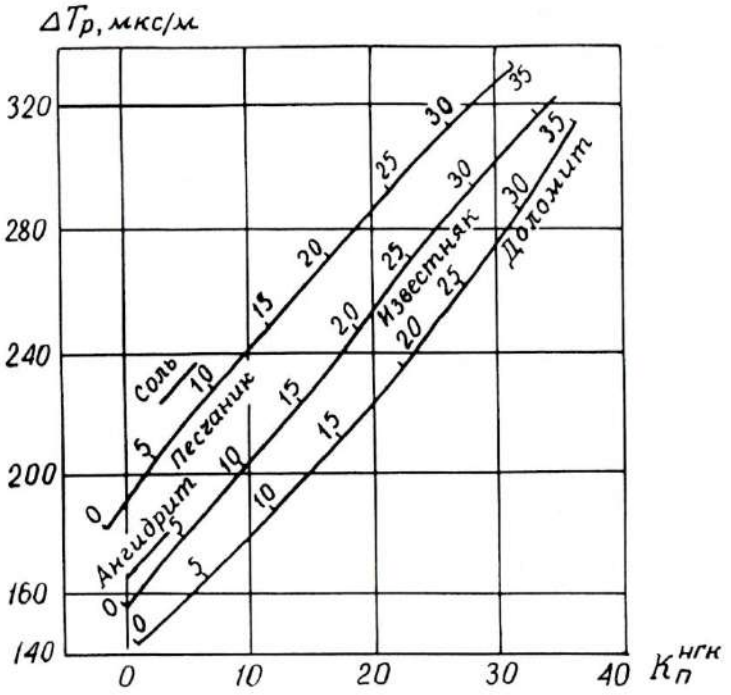


Рис. 1. Кросс-плот для определения литологического состава пород по данным акустического и нейтронного гамма-каротажа (Стрельченко В. В., 2008)

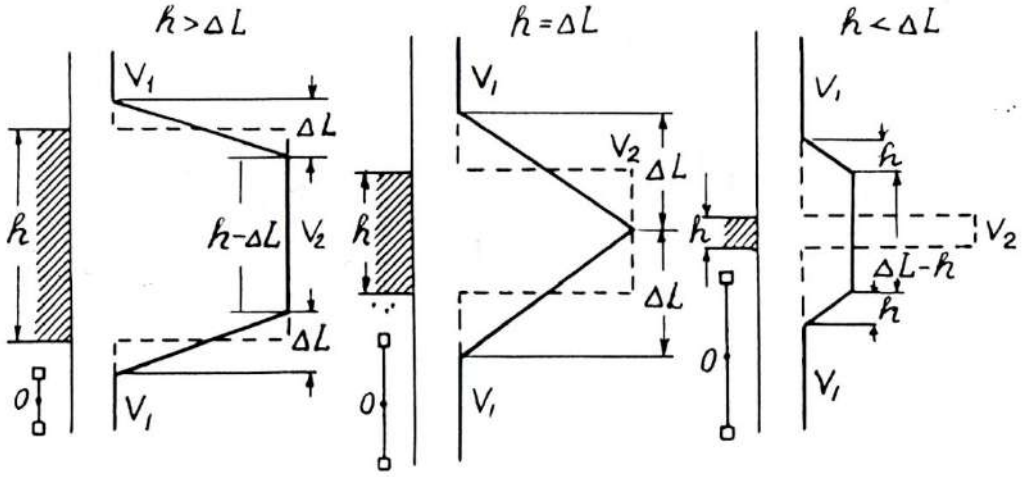


Рис. 2. Диаграмма акустического каротажа по скорости над пластами различной мощности (Латышова М. Г., 1986)

большой мощности пластов ($h > \Delta L$) для определения положения границ пластов может быть использовано правило полумаксимума аномалии (рис. 2).

Определение коэффициента пористости коллекторов межзернового типа основано на решении уравнения «среднего времени»:

$$\Delta T_{\text{Р}} = (1\text{-}K_{\text{п}})\cdot\Delta T_{\text{Рск}} + K_{\text{п}}\cdot\Delta T_{\text{Рж}}, \qquad (2)$$

откуда $$K_{\text{п}} = \frac{\Delta T_{\text{Р}} - \Delta T_{\text{Р ск}}}{\Delta T_{\text{Рж}} - \Delta T_{\text{Р ск}}} \qquad (3)$$

Интервальное время упругих волн по коллектору $\Delta T_{\text{Р}}$ снимается с диаграмм АК, интервальное время минерального скелета породы $\Delta T_{\text{Рск}}$ и интервальное время в жидкости (или в газе), заполняющих поры породы, $\Delta T_{\text{Рж}}$ определяются по лабораторным анализам керна. (При выполнении данной работы они могут быть взяты из табл. 1).

При этом следует учитывать, что скорость упругих волн в жидкости и газе зависит еще и от температуры и давления, под которыми они находятся.

В частности, интервальное время (и скорость) для воды при заданных температуре и давлении $\Delta T_{\text{Рж}}$ и $V_{\text{Рж}}$ могут быть определены с помощью номограммы, разработанной фирмой Герхард-Оуэн (Латышова М. Г., 1996). Эта номограмма приведена на рис. 3.

Температуру определяют по термометрии, а пластовое давление – по результатам манометрии в эксплуатационных скважинах на глубине середины продуктивного пласта после остановки скважины на 10-15 дней, т.е. тогда, когда забойное давление в скважине успевает сравняться с пластовым.

Для приближенных расчетов при отсутствии данных о пластовом давлении можно принять допущение, что пластовое давление приблизительно равно удвоенному гидростатическому.

Напомним, что каждые 100 м водяного столба создают гидростатическое давление в 1 МПа, а 100 м бурового раствора повышают это давление во столько раз, во сколько плотность раствора больше плотности воды.

В случае, если в порах коллектора в зоне исследования акустическим каротажем содержатся наряду с водой еще нефть или газ, то значение $\Delta T_{\text{Рж}}$ рассчитывают по формуле (Стрельченко В. В., 2008):

$$\Delta T_{\text{Рж}} = \Delta T_{\text{Рв}} \cdot K_{\text{В}} + \Delta T_{\text{Рн,г}}(1 - K_{\text{В}}), \qquad (4)$$

где $K_{\text{В}}$ – коэффициент водонасыщенности;

$\Delta T_{\text{Рн,г}}$ – интервальное время продольных волн для нефти и газа.

Для глинистых коллекторов уравнение «среднего времени» усложняется. Так, например, в случае рассеянного содержания глины в поровом пространстве коллектора, уравнение имеет вид:

$$\Delta T_{\text{Р}} = \Delta T_{\text{Рск}}(1 - K_{\text{п}} - C_{\text{гл}}) + \Delta T_{\text{Рж}}(K_{\text{п}} + C_{\text{гл}}), \qquad (5)$$

где $C_{\text{гл}}$ – объемное содержание рассеянной глины.

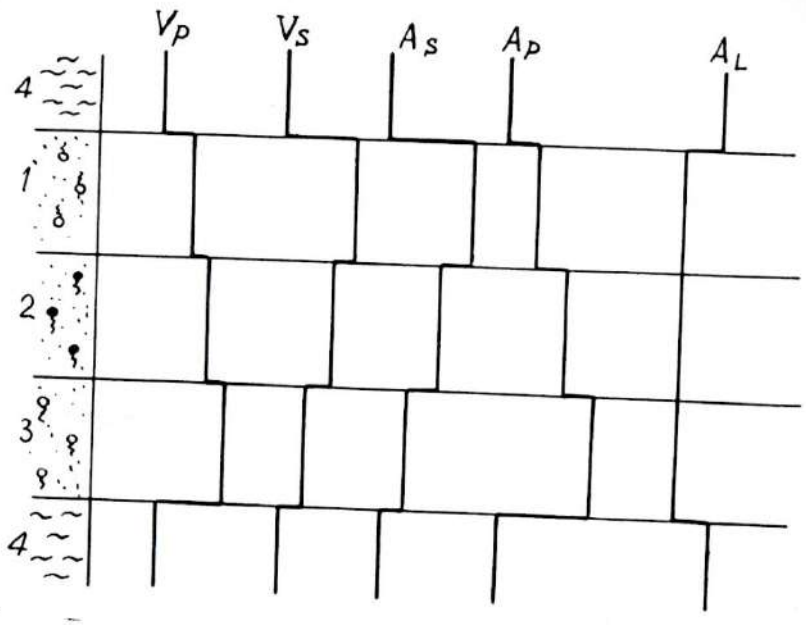


Рис. 4. Зависимость результатов акустического каротажа от характера насыщения пластов (Ивакин В. Н. и др., 1978)

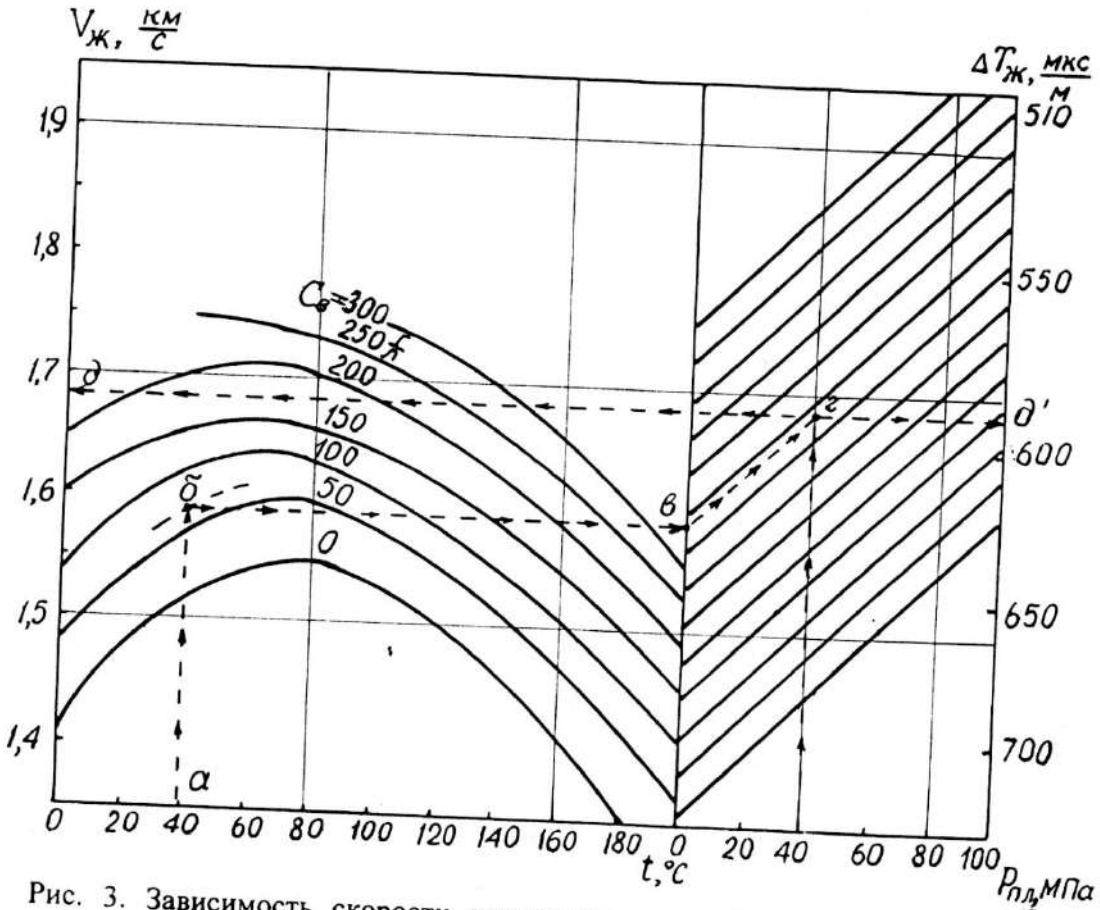


Рис. 3. Зависимость скорости продольных волн V_p и интервального времени ΔT_P в воде от ее минерализации $C_в$, температуры t^o и давления $P_{пл}$ (по материалам фирмы Герхард-Оуэн)

Для слоистого и контактного распределения глинистого материала:

$$\Delta T_{\text{Р}} = \Delta T_{\text{Рск}} (1 - K_{\text{в}} - C_{\text{гл}}) + \Delta T_{\text{Рж}} \cdot K_{\text{п}} + \Delta T_{\text{Ргл}} \cdot C_{\text{гл}}, \qquad (6)$$

где $\Delta T_{\text{Ргл}}$ – интервальное время продольных волн для глинистого материала.

При этом следует учитывать, что интервальное время глин $\Delta T_{\text{Ргл}}$ зависит от глубины их залегания, как это показано в табл. 2.

Таблица 2

Зависимость интервального времени продольных волн глин от глубины залегания

$H_{\text{скв}}$, м	300	1000	2000	3000	4000	5000
$\Delta T_{\text{Ргл}}$, мкс/м	500	400	330	290	270	260

ЗАДАНИЕ

1. По комплексу каротажных диаграмм, включающему диаграмму $\Delta T_{\text{Р}}$, выполнить литологическое расчленение разреза скважины; выделить и пронумеровать пласты-коллекторы.
2. Определить мощность коллекторов и занести в табл.3.
3. Используя данные всего комплекса ГИС, определить характер насыщения каждого из коллекторов.
4. Определить глинистость ($C_{\text{гл}}$) коллекторов по данным методов ПС или ГК.
5. Из выражения (5) вывести формулу для расчета $K_{\text{п}}$ коллектора, содержащего рассеянный глинистый материал.
6. По диаграмме ПС определить минерализацию пластовых вод в каждом из коллекторов (Работа № 5).

7. Рассчитать пористость коллекторов. При расчетах принять температуру пластов t= 60 ^{0}C, плотность бурового раствора γ=1.2 г/см^3. $\Delta T_{\text{Рск}}$=200 мкс/м. $\Delta T_{\text{Рж}}$ найти по номограмме рис.3.

Полагать, что буровой раствор заполняет всю скважину до поверхности земли. Условно считать, что $P_{\text{пл}} \approx 2P_{\text{скв}}$.

Таблица 3

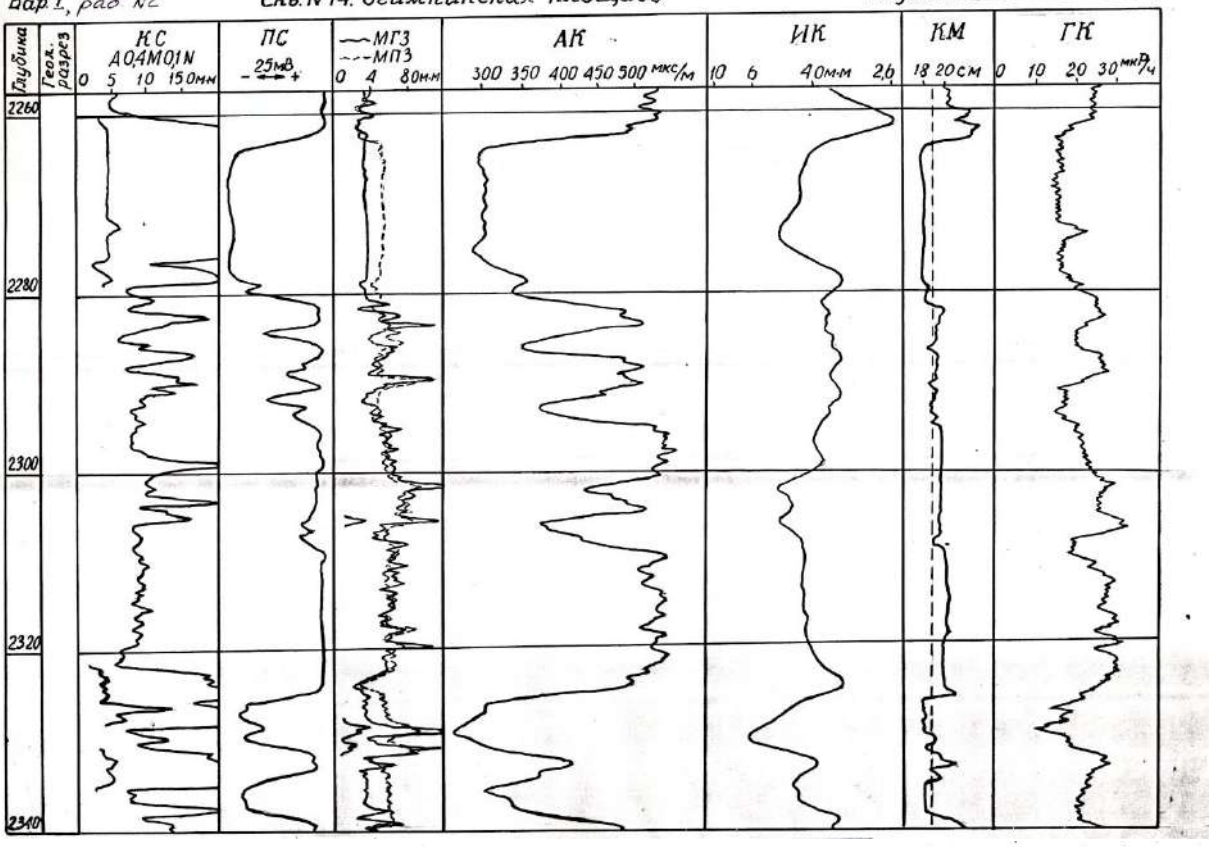
Результаты интерпретации

№ п/п	Интервал пласта	Мощность пласта, h, м	Глинистость, $C_{\text{гл}}$, %	Минерализация, $C_{\text{в}}$, г/л	$\Delta T_{\text{Р}}$, мкс/м	$\Delta T_{\text{Рж}}$, мкс/м	$K_{\text{п}}$, %	Характер насыщения

8. Составить отчет по выполненной работе.

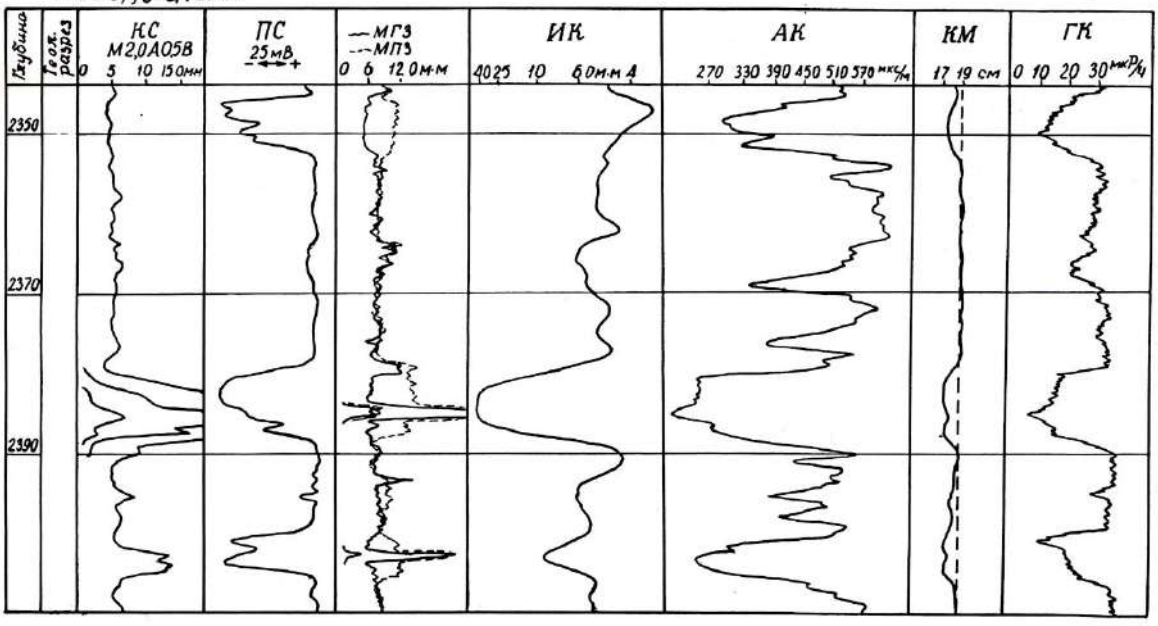
Составил: И. Г. Сковородников

Вар. I, раб. №2 Скв. N14. Огимкинская площадь Студент _____



II вар., раб. №2 Скв. №4. Мамонтовская площадь Студент _____

$t = 60°C$; $\rho_в = 2{,}4$ Ом·м

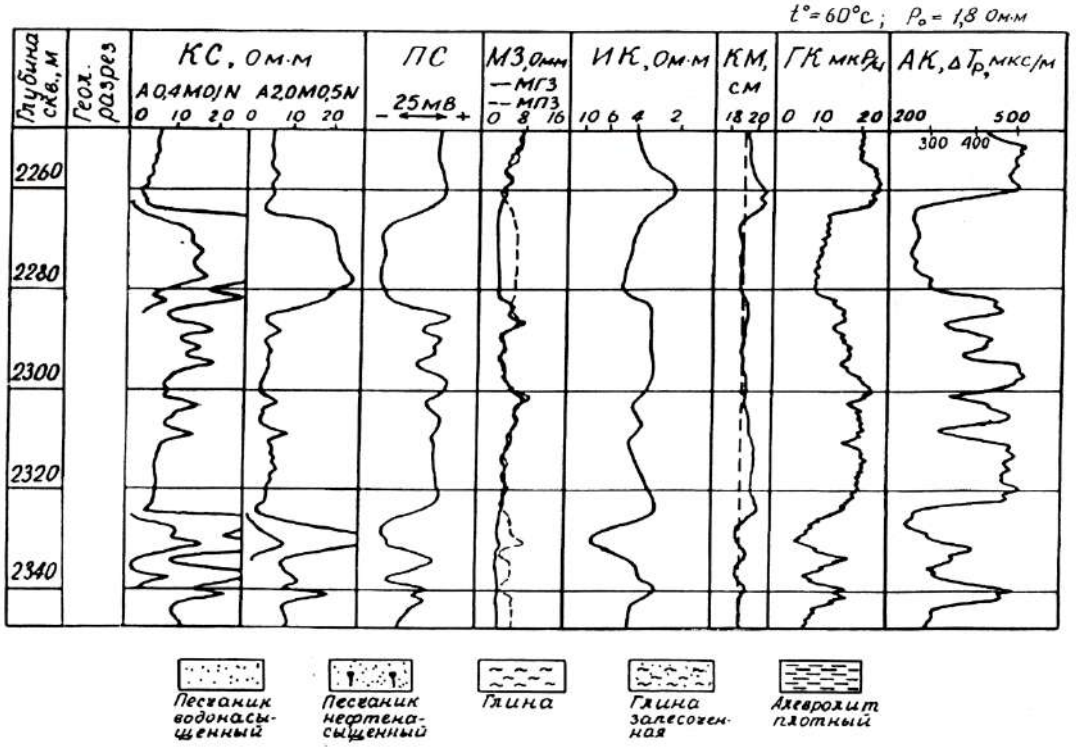


Песчаник Песч. нефтеносн. Глина Плотн. алевролит

Вар.Ш, раб №2

ФИО студента

$t° = 60°C$; $P_в = 1{,}8$ Ом·м



Министерство науки и высшего образования РФ

ФГБОУ ВО

«Уральский государственный горный университет»

Н. С. Земцов

Обработка данных ГИС в системе «Прайм»

Методические указания
к практическим занятиям и самостоятельной работе по дисциплине «Алгоритмы и системы обработки данных ГИС» для студентов специальности 21.05.03 – «Технология геологической разведки» всех форм обучения

Екатеринбург
2020

Министерство науки и высшего образования РФ
ФГБОУ ВО

«Уральский государственный горный университет»

ОДОБРЕНО
Методической комиссией
факультета геологии
и геофизики УГГУ
«22» декабря 2020 г.
Председатель комиссии

_____проф. В. И. Бондарев

Н. С. Земцов

Обработка данных ГИС в системе «Прайм»

Методические указания
к практическим занятиям и самостоятельной работе по дисциплине «Алгоритмы и системы обработки данных ГИС» для студентов специальности 21.05.03 – «Технология геологической разведки» всех форм обучения

Издание УГГУ Екатеринбург, 2020

УДК 550.8.055

З 51

Рецензент: *Ю В Белышев,* канд. геол.-минерал. наук., доцент кафедры геофизики УГГУ.

Методическое пособие рассмотрено на заседании кафедры геофизики « 5 » октября 2020 г. (протокол № 1) и рекомендовано для издания в УГГУ.

Н. С. Земцов

З 51 Обработка данных ГИС в системе «Прайм» / методические указания Н. С. Земцов; Урал. гос. горный ун-т. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2020. – 80 с.

В методических указаниях кратко изложены основные приемы обработки и интерпретации материалов ГИС в программе «Прайм». Целью данного руководства является обучение студентов навыкам обработки и интерпретации материалов ГИС. Освоение основ обработки данных ГИС на ЭВМ позволит будущим специалистам геофизикам профессионально ориентироваться в промыслово-геофизическом материале.

Учебное пособие предназначено для студентов специализации № 2 «Геофизические методы исследования скважин» специальности 21.05.03 – «Технология геологической разведки» очной и заочной формы обучения.

© Н. С. Земцов
© Уральский государственный горный университет, 2020

ВВЕДЕНИЕ

Прайм — это программное обеспечение для обработки, анализа и хранения геолого-геофизических данных. Система позволяет наладить взаимодействие между разными группами специалистов, работающих с данными геофизических исследований скважин, выполнять анализ и многоскваженную обработку больших объемов данных.

Базовая версия (ядро) — это базовый набор программных модулей для работы с данными геолого-геофизических исследований скважин.

Программа позволяет выполнять обработку как непрерывных по глубине данных (н-р, каротажных кривых), так и попластовых данных (таблицы керна, насыщения, литологии, стратиграфии и др.).

Прайм позволяет импортировать данные ГИС, в том числе данные инклинометрии, из файлов различных форматов: LAS, LIS, LBS, ИНГИС, АРМГ, LOG, ZAK, RGI, GIS, PLN, LST, CRV, ИНГЕФ и др. Файлы могут импортироваться поштучно или группой.

В Прайме можно настроить отображение масштабных сеток и линеек для кривых ГИС, отображение самих кривых, использовать цветовые заливки между ними, специальные заливки (рисунки) для отображения колонок литологии, насыщения и т.п. Области шапки и подвала планшета настраиваются пользователем по принципу конструктора - в рабочую область вставляются тестовые и графические блоки, которые впоследствии заполняются информацией по скважине. Планшеты могут быть выведены на любое печатающее

устройство, а также быть сохранены в виде графического файла формата BMP, EMF, WMF, SGM, TIFF, PDF и др.

Один раз создав в Прайме каротажный планшет для определенного набора данных ГИС, пользователь может сохранить этот планшет как шаблон. Для всех последующих аналогичных исследований уже не потребуется тратить время на настройку визуализации данных, достаточно будет применить сохраненный ранее шаблон и все данные расположатся нужным образом на планшете. В шаблоне могут быть сохранены не только настройки отображения кривых ГИС и колонок стратиграфии, литологии и т.п., но и ссылки для автоматического заполнения приложений, например, шапки каротажной диаграммы. В последнем случае программа сама будет находить среди данных планшета (либо рабочей области WS) нужную информацию и выводить её в шапку каротажной диаграммы.

Доступны как ручная увязка, когда пользователь вручную указывает как сдвинуть и сжать/растянуть кривую или группу кривых, так и автоматическая увязка кривых по глубине. В последнем случае увязка осуществляется автоматически по кривым локатора муфт.

Все данные, загружаемые и получаемые в результате обработки в Прайме, автоматически сохраняются в его внутреннюю рабочую область - файл с расширением WS (Work Space). Формат данного файла был разработан ГеоТЭК специально для работы с геофизическими данными. В одном WS – файле может содержаться несколько планшетов, каждый из которых будет отображать

определенную пользователем часть загруженных/полученных в результате обработки данных.

Программы пользователя – это внутренний язык системы, на котором можно писать программы разной степени сложности. Даже пользователи, не являющиеся программистами могут писать программы на встроенном языке. Это обеспечивается широким набором встроенных функций и возможностей.

1. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ «ПРАЙМ»

1.1 ГОРЯЧИЕ КЛАВИШИ

Щелчок правой кнопки мыши, подведенной к объекту планшета или его линейке – вход в настройку отображения объекта. Щелчок правой кнопки мыши, подведенной к объекту планшета + **ALT** – вход в данные объекта.

ALT + правая кнопка мыши на рамке (в шапке/подвале) включает режим "копирование рамки", т. е. открывается диалог редактирования, если в нём нажать "Дальше", вставляется новая рамка с тем, что отредактировано.

Если подвести курсор мыши к объекту планшета, высветятся данные этого объекта (состав этих данных задается в настройке умолчаний).

Движение по данным кривой, попластовой колонки или колонки стратиграфии нажатой левой кнопкой мыши дает возможность просмотра значений и других параметров объекта в так называемом

«плавающем статусе при отслеживании значений», положение которого настраивается.

Двойной щелчок левой кнопки мыши по объекту планшета или его линейке выделяет объект. При этом цвет объекта меняется на «Цвет активных объектов», задаваемый в настройке умолчаний.

При нажатой кнопке **ALT** можно «подхватить» кривую (когда кривая подхвачена, **ALT** можно отпустить, подхватить можно также за шапку кривой) и перетащить ее на сетку (при этом перетаскиваемой кривой передаются параметры сетки) или другую кривую (при этом перетаскиваемой кривой передаются все параметры настройки отображения кривой за исключением названия, единиц измерения, условий загрузки, цвета). Перетаскивать можно несколько кривых, если они предварительно выделены.

При вставке кривой на планшет при нажатой кнопке **ALT** можно сразу «направить» ее на нужную сетку или нужную кривую.

Если перетаскивание осуществляется с помощью комбинации клавиш **ALT** и **SHIFT**, то перетаскивается также и цвет кривой. Перетаскивание с Alt+Shift работает следующим образом: начинаем перетаскивание только с Alt (без Shift), но при кидании кривой на кривую (в момент отпускания кнопки мыши) Shift должен быть нажат. Данная комбинация работает как в области диаграмм, так и в области линеек (причём начать перетаскивание можно с линейки, а закончить на диаграммах и наоборот).

Если же удерживать нажатой клавишу **SHIFT** *в момент подтверждения выбора в диалоге вставки кривых* (т.е. при нажатии на кнопку Дальше в этом диалоге), то к вставляемой кривой не будут

применены шаблоны из текущего планшета, а будет предложено выбрать её границы вручную.

Перетаскивание надписи в произвольном направлении осуществляется левой кнопкой мыши при нажатой кнопке **ALT**. Перетаскивать можно несколько надписей, если они предварительно выделены.

Перетаскивание «примитива» в горизонтальном направлении (с сохранением его глубины) осуществляется левой кнопкой мыши при нажатой кнопке **ALT**. Перетаскивать можно несколько примитивов, если они предварительно выделены.

Перетаскивание примитива в произвольном направлении осуществляется левой кнопкой мыши при одновременно нажатых кнопках **ALT** и **SHIFT**. Перетаскивать можно несколько примитивов, если они предварительно выделены.

Перетаскивание колонок (включая попластовые, пустые колонки, колонки стратиграфии, сетки линейные и логарифмические) осуществляется левой кнопкой мыши при нажатой кнопке **ALT**.

Изменение ширины колонок. При нажатой кнопке **CTRL** подвести курсор мыши к границе колонки, появится двойная стрелка. Нажать левую кнопку мыши и переставить границу в нужное место. В плавающем статусе появляется текущая ширина колонки.

В списке объектов планшета при нажатой клавише **SHIFT** кнопка «Удалить» трансформируется в «Удалить данные», при нажатой **CTRL** или **CTRL+ALT** — в «Защ. данные»: **CTRL+<кнопка «Удалить»>** позволяет защитить данные текущего или выделенных объектов от случайных изменений (соответствует

установке флажка «Запрет изменений» в свойствах кривой, попластовой кривой или другого объекта с данными), **CTRL+ALT+<кнопка «Удалить»>** разрешает изменение данных текущего или выделенных объектов (соответствует снятию флажка «Запрет изменений»). Объекты, данные которых защищены от случайных изменений, выделяются в списке нижним подчёркиванием.

В том же списке объектов планшета **CTRL+F** и **CTRL+A** активируют фильтр.

Если в настройке отображения данных попластовых кривых, попластовых и стратиграфических колонок щелкнуть по кнопке «Данные» с нажатым **SHIFT**-ом, появится промежуточное диалоговое окно с данными, из которого значения массива будут показаны в составе «Глубина – Данные (код литологии, код стратиграфии)». При обычном нажатии кнопки «Данные» в этих колонках сразу высвечиваются данные массива в составе «Кровля – Подошва - Данные».

При увязке кривых по опорным реперам в режиме задания реперов движение мыши вверх – вниз перемещает соответственно вверх - вниз увязываемую кривую. Если эту манипуляцию проводить при нажатой клавише **CTRL**, кривая одновременно будет перемещаться и вправо – влево.

Если при нажатой кнопке **SHIFT** щелкнуть левой кнопкой мыши по пиктограмме панели объектов, на ней установится красный крестик, означающий, что данный объект недоступен для выделения на планшете двойным щелчком левой кнопке мыши. Повторное

нажатие трансформирует красный крестик в зеленую галочку, что возвращает возможность выделения. Используется, когда объекты накладываются друг на друга, мешая выделению.

CTRL+PageUp/PageDown – переход на начало/конец планшета

CTRL+<стрелка влево/вправо> – переход влево/вправо на один экран (при просмотре широких планшетов)

CTRL+<стрелка вверх/вниз>, а также **Серый «+»/Серый «–»** – увеличение/уменьшение масштаба планшета по глубине

Если подвести курсор мыши к верхней границе раздела линеек, изображение курсора примет вид вертикальной двойной стрелки, перечеркнутой двойной горизонтальной линией. Если в этот момент нажать правую кнопку мыши, появится список из двух строк – «Панель объектов» и «Линейка» (в режиме просмотра шапки или подвала список содержит строки «Линейка» и «Верт. линейка»). Щелкая по этим строкам левой кнопкой мыши, можно включать – выключать отображение панели объектов, линейки на этой линии или вертикальной линейки. Аналогично можно включить – отключить линейку на линии, разделяющей поле линеек и поле диаграммы.

Щелчок правой кнопки мыши в пустом месте планшета вызывает контекстное меню, дублирующее некоторые команды и опции.

Если подвести курсор мыши при нажатой кнопке **CTRL** к какому-либо пункту меню, вид курсора изменится, превратившись в так называемую «каретку». Если теперь в режиме «каретки» щелкнуть по строке меню левой кнопкой мыши, то откроется окно

редактирования этого пункта меню, в котором можно посмотреть или откорректировать только его настройки. Аналогичный вход при одновременном нажатии **CTRL** и **SHIFT** позволяет далее перейти к редактированию или просмотру следующих пунктов меню.

При наведении на пункт меню с подключенной программой пользователя комбинация **SHIFT+**левая кнопка мыши открывает текст подключенной программы.

SPACE – вывод окна списка объектов

INSERT – Вставка объекта в область диаграмм (пустой рамки в шапку/подвал) **CTRL+INSERT** – Копирование строки отслеживания (появляющейся при движении по объекту, удерживая нажатой левой кнопки мыши) в буфер обмена

ALT+INSERT – Вставка примитива в область диаграмм (рамки с рисунком в шапку/подвал)

DELETE – Удаление выделенных объектов

CTRL+ALT+A – переход на альтернативную шапку (подвал) и обратно

CTRL+ALT+C - переход на сводную шапку (подвал) и обратно (для корреляционных схем)

CTRL+D – переключение в режим просмотра диаграмм **CTRL+T** – переключение в режим просмотра шапки **CTRL+F** – переключение в режим просмотра подвала **CTRL+H** – переключение отображения линейки **BACKSPACE** – переключение отображения линейки **CTRL+L** – включение и отключение легенды

CTRL+ «+» – выделение всех объектов

CTRL+ «-» - снятие выделения со всех объектов

CTRL+ «*» (на Numpad) – Поменять выделение всех объектов **CTRL+1 –** быстрая установка масштаба просмотра планшета 1:1. **CTRL+Z** или **ALT+BACKSPACE –** отмена последней операции.

CTRL+Y или **CTRL+SHIFT+Z –** возврат последней отменённой операции.

CTRL+F10 – в режиме выбора мышью глубины или позиции на планшете позволяет ввести эти параметры с клавиатуры.

F1 – справка по системе **F4** – параметры планшета **F5** – параметры легенды

F6 – переход от одного окна (планшета) к другому (если открыто несколько планшетов) **F9** – в режиме запроса системы на выбор объекта(ов) (когда мигает «галочка») подтверждает выбор (аналогично в этом режиме действует клавиша **Esc**).

CTRL+BREAK – в режиме запроса системы на выбор объекта(ов) или на выбор мышью позиции на планшете отменяет запрос и выдаёт в вызывающую программу исключение. Используется для прерывания работы программ, если в них не предусмотрено иного механизма немедленного прекращения работы. Например, в случае если какая-либо программа выдаёт последовательно много запросов на выбор нескольких объектов, причём любой из этих объектов может быть не указан (т.е. то, что Вы отказались от выбора объекта, не побуждает программу к прекращению работы), использование этой комбинации – единственный способ быстро выйти из программы. При этом программа может выдать сообщение о прерывании работы, а может и завершиться молча.

1.2 ПЛАНШЕТ

Планшет представляет собой рабочий стол пользователя Системой. Формирование и использование планшета – необходимые и важные компоненты интерактивной технологии обработки данных ГИС.

Планшет может содержать как исходные данные, так и результаты интерпретации. Некоторые планшеты являются статическими, т.е. практически не изменяются с момента создания. Другие, наоборот, являются динамическими, и их содержание изменяется в процессе работы с данными ГИС.

Любой планшет может сохраняться в локальной базе данных WS, что позволяет в нужный момент вернуться к нему. Следует отметить, что в планшете не сохраняются копии данных с базы, сохраняются лишь ссылки на них. Поэтому увеличение числа записанных планшетов в базе практически не увеличивает размер базы. Таким образом в одном единственном файле локальной базы могут быть сохранены:

- Исходные данные,
- Результаты интерпретации,
- Графические планшеты,
- Тексты заключения.

Это обстоятельство делает весьма удобным процесс хранения и обмена данными ГИС в цифровом виде, например, между заказчиком и исполнителем.

Созданный в Системе планшет может быть распечатан на любом печатающем устройстве, т.е. представлен в виде твердой копии.

Планшет может содержать следующие разделы (рис.1.1):

- раздел шапки,
- раздел линеек,
- раздел легенды,
- раздел кривых,
- раздел подвала.

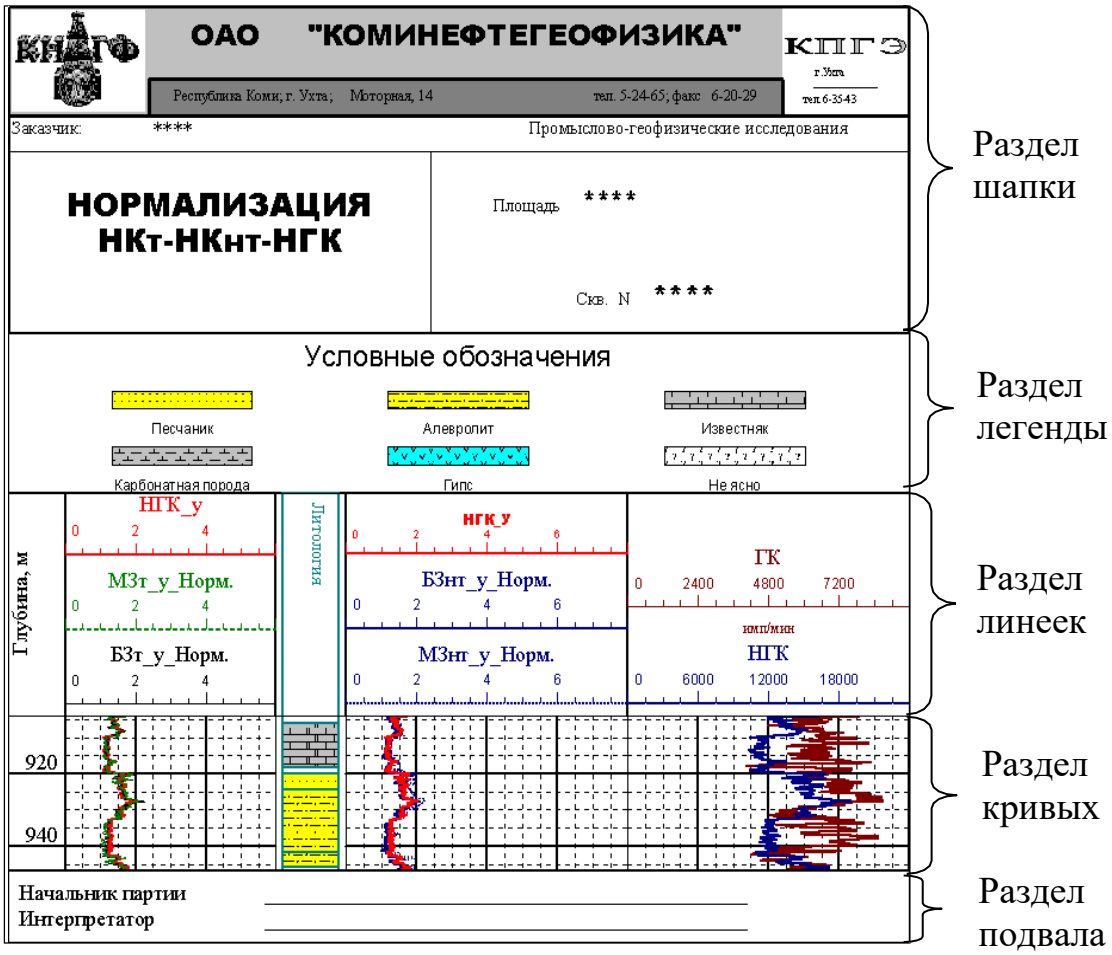


Рис. 1.1. Пример планшета

В каждом разделе имеются свои объекты для отображения на планшете. Разделы ШАПКИ и ПОДВАЛА совершенно одинаковы, и отличаются лишь расположением на планшете относительно раздела кривых. Шапка располагается выше раздела кривых, подвал – ниже.

Раздел КРИВЫХ включает в себя не только кривые, но и множество других объектов.

1.3.1.Общие свойства объектов планшета

Объекты в разных разделах обладают разными свойствами, но способы манипуляции с ними во многом аналогичны. Это обстоятельство облегчает работу пользователя с объектами. Можно получить доступ к свойствам объекта непосредственно на планшете при помощи манипулятора мыши или из списка объектов.

1.3.2.Просмотр списка объектов

Находясь в нужном разделе нажмите клавишу «Пробел», например, если в разделе ШАПКИ или ПОДВАЛА (рис. 1.2). В этом окне можно производить манипуляции с объектами. Эти же операции могут быть активизированы визуально непосредственно на планшете при помощи манипулятора мыши. Выбор объектов из списка удобен в том случае, когда объектов на планшете очень много или они сильно перекрываются.

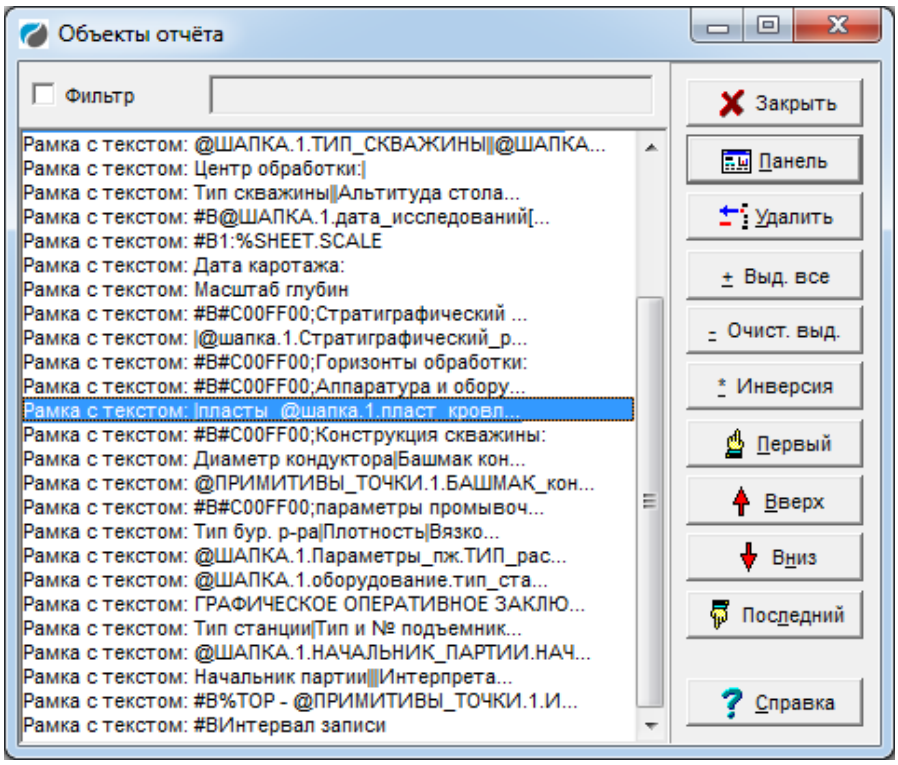


Рис. 1.2. Окно списка объектов

1.3.3.Просмотр информации об объекте

Информацию о свойствах объекта можно прочитать, находясь в окне списка объектов. Непосредственно на планшете получить ту же информацию можно, если поместить указатель мыши на объект и держать левую клавишу мыши, не отпуская. При этом в строке статуса будет отображаться информация об объекте. Например, при движении указателем мыши вдоль кривой, в строке статуса будут отображаться значения кривой для данной глубины. Если при этом еще нажать кнопку «SHIFT», то в строке статуса будут отображаться текущие значения всех кривых, находящихся на сетке.

1.3.4.Активизация объекта

Эта операция часто используется для интерактивного выделения объекта. При работе с мышью - дважды щелкнуть на этом объекте левой кнопкой мыши.

При работе с клавиатуры - войти в окно списка объектов и нажать клавишу «Ins» или дважды щелкнуть мышкой на строке списка. При этом активизированный объект выделяется цветом активных элементов. Отмена активизации производится аналогичным образом.

Цвет активных элементов может быть изменен в меню НАСТРОЙКИ Системы.

1.3.5.Просмотр свойств объекта

При работе с мышью - щелкнуть на объекте правой кнопкой мыши.

При работе с клавиатуры - войти в окно списков объекта выбрать необходимый объект и нажать кнопку **Панель**.

1.3.6.Просмотр данных объекта

Щелкнуть на кнопке **Данные** объекта. После этого появиться окно редактирования данных объекта, зависящее от объекта. Для кривых окно данных будет еще зависеть от формата кривой. В этом окне можно вручную изменять данные.

1.3.7.Удаление объекта из планшета:

Активизировать объект. После этого выдать команду удаления, нажав клавишу «Del» или указав мышью на индикатор удалить  . После подтверждения запроса программы на удаление объектов

активизированные объекты будут удалены из планшета, но не из базы.

1.3.8.Раздел шапки

В этом разделе обычно отражается информация о скважине (например, название заказчика и исполнителя, название месторождения, номер скважины, решаемая задача, информация о замерах, интервалы перфорации и т.д.). Здесь же может содержаться текст заключения по результатам интерпретации (рис1.3).



Заказчик					
Задача №004	**004. Определение профиля притока и источников обводнения и КВД при компрессировании.**				
Местоположение	Скважина		**00555_**		
	Куст		**044_**		
	Лицензионный участок		**Каменный (восточная часть)**		
	Месторождение		**Краснoленинское**		
	Площадь		**Восточно-Каменная**		
Дата каротажа	15/11/2007 21:08:00	17/11/2007 13:15:00	Время каротажа 39:50	Заключение 18/11/2007	
Данные по скважине	Тип скважины	Эксплуатационная	Состояние по фонду	в работе	
	Альтитуда стола ротора	32.7 м	Диаметр скв.по долоту	215.9 мм	
	Башмак кондуктора	685.0 м	Диаметр кондуктора	227.2 мм	
	Башмак э/колонны	1863.0 м	Диаметр э/колонны	132.0 мм	
	Воронка НКТ	1768.3 м	Диаметр НКТ	62.0 мм	
	Искусственный забой	1858.0 м	Текущий забой	1829.0 м	

Рис. 1.3. Пример раздела шапки

1.3.9.Раздел линеек

Раздел линеек - раздел, содержащий, в основном, линейки кривых. Она также может содержать названия колонок и расшифровки легенд заливок (рис. 1.4).

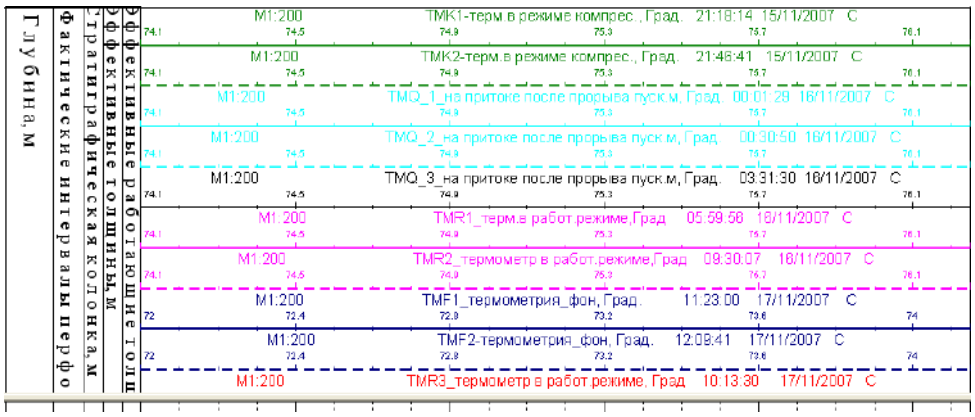


Рис. 1.4. Раздел линеек.

Линейки кривых и других объектов располагаются в Системе друг относительно друга по порядку номеров кривых (номер кривой также определяет цвет, толщину и стиль линии кривой).

Чтобы вручную изменить порядок следования линеек щёлкните правой кнопкой мыши на планшет, удерживая нажатой клавишу «Ctrl». В появившемся меню выберите пункт «Порядок объектов линейки» (рис. 1.5).

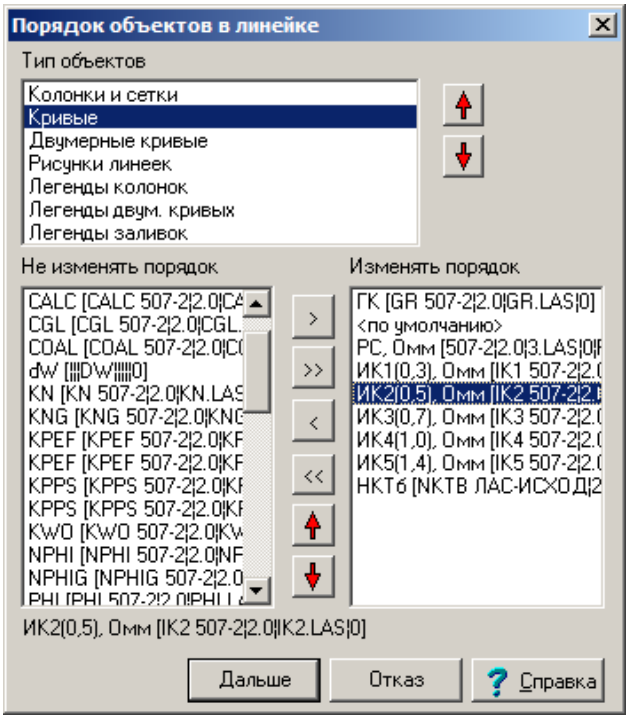


Рис. 1.5. Порядок объектов в линейке.

1.3.10. Раздел кривых

В этом разделе могут быть представлены следующие 17 видов объектов: пустая колонка, колонка глубин, конструкция скважины, попластовая колонка, литологическая колонка (колонка литологий), линейная сетка, логарифмическая сетка, колонка стратиграфии, кривые, надписи, реперы, заливки, рисунки, шкалы, двумерные кривые, колонки керна, векторные кривые.

1.3.11. Вставка нового объекта

Нажать “мышкой” на кнопку вставки объектов. Появляется диалоговое окно выбора объекта (рис. 1.6). Нужно нажать на соответствующую кнопку окна. Если активизирована планка вставки объектов, то нужно выбрать соответствующую пиктограмму.



Рис. 1.6. Панель инструментов вставки объектов

В отличие от объектов раздела ШАПКИ, объекты раздела КРИВЫЕ могут пересекаться. В случае кривых и сеток пересечение объектов даже необходимо и должно удовлетворять определенным требованиям.

Все объекты на планшете имеют начало расположения на планшете и цвет.

1.3.12. Пустые колонки

Пустая колонка содержит минимум информации, и может использоваться как элемент оформления планшета. Основное ее

свойство - название колонки, которое отображается в разделе линек. При помощи названия колонки можно отобразить в разделе линеек любые тексты.

1.3.13. Колонки глубин

Эта колонка предназначена для отображения глубины и абсолютных отметок (рис 1.7). Абсолютные отметки отображаются на тех глубинах, где заданы данные инклинометрии.

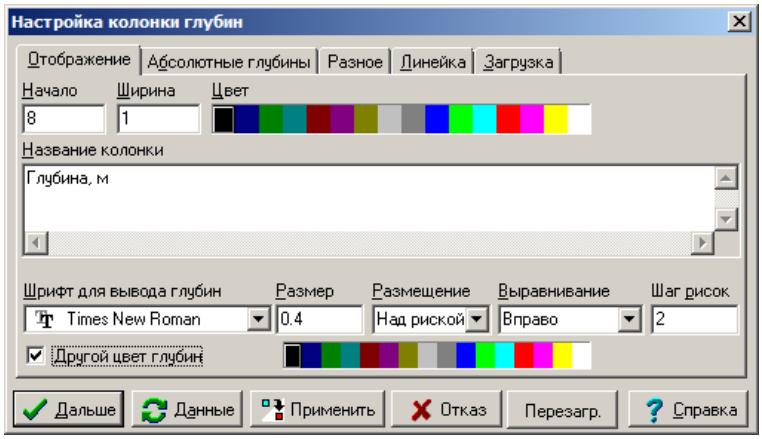


Рис 1.7. Настройка колонки глубин

1.3.14. Сетки

Сетки, как и пустые колонки, не содержат данных. Они используются для разграфки раздела кривых, а также линеек кривых.

Линейные сетки

Линейная сетка рисуется в линейном масштабе, все вертикальные линии идут через одинаковые промежутки.

Логарифмические сетки

Логарифмическая сетка рисуется в логарифмическом масштабе (рис 1.8).

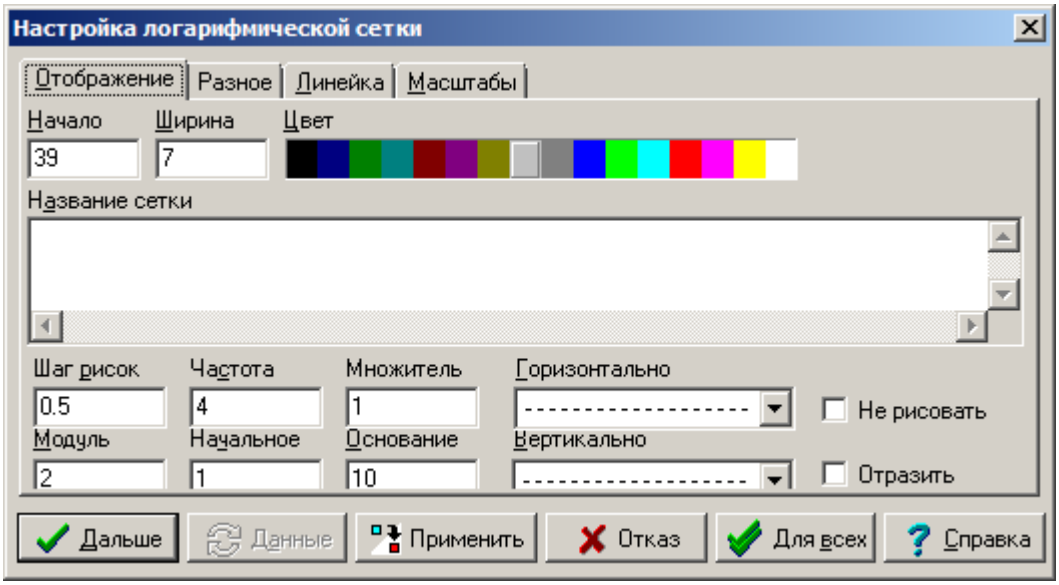


Рис. 1.8. Настройка параметров сетки

1.3.15. Кривые

Все кривые на планшете с точки зрения вставки в планшет делятся на два вида: 1) исходные кривые, 2) результирующие кривые.

1.3.16. Попластовые колонки

Один из типов колонок, поддерживаемых системой – это так называемая попластовая колонка, которая предназначена для отображения в виде колонки попластовых данных. Она может быть использована для отображения как литологий и стратиграфии, так и любых других данных по пластам.

1.3.17. Колонка литологий

При выборе этой пиктограммы появится диалог, предлагающий выбрать тип литологической колонки:

- «Литолог.» – колонка литологий;
- «Насыщение» – колонка насыщения;
- «Коллектор» – колонка коллекторов;

- «Эф. р. тлщ.» – колонка эффективных работающих толщин;
- «Другой лит.» – другой тип колонки.

Разница между этими вариантами состоит в ресурсе таблицы, из которого создаются данные колонки. Так, например, при выборе варианта Коллектор данные будут созданы из ресурса КОЛЛЕКТОР файла WSIGF.RES. При выборе варианта Другой лит. Система предложит выбрать файл ресурсов и ресурс для

1.3.18. Надписи

Надпись представляет собой обычный текст, расположенный на планшете. Надпись может быть привязана к какому-либо объекту планшета и сохранять свою позицию относительно этого объекта.

1.3.19. Заливки

Заливками называются объекты, которые закрашивают указанную область планшета каким-либо рисунком или цветом. При этом границами этой области могут быть:

- кривые;
- постоянное значение;
- начало и ширина;
- интервал по глубине.

1.3.20. Двумерные кривые

Подобно обычным («одномерным») кривым планшета, отображающим зависимость какой-либо величины (в дальнейшем эту величину будем называть **функцией**) от глубины (далее – **аргумент**), двумерные кривые планшета изначально предназначены для отображения зависимости некой функции от двух аргументов, один

из которых – глубина. Двумерные кривые также могут использоваться для визуализации функции одного аргумента, не являющегося глубиной и даже для визуализации функции от одной лишь глубины, когда требуется отобразить зависимость с помощью плавного перехода цветов.

1.3.21. Примитивы точки

Вставка примитива точки производится нажатием кнопки на верхней панели планшета. После этого появляется список примитивов точки и после выбора из него и указания позиции выводится диалог вставки:

1.3.22. Примитивы интервала

Вставка примитива интервала производится нажатием кнопки на верхней панели планшета. Примитивы интервала аналогичны примитивам точки за исключением того, что занимают на планшете определённый интервал глубин, который задаётся полями КРОВЛЯ и ПОДОШВА из состава их данных.

1.3.23. Конструкция скважины

Вставка колонки конструкции скважины производится нажатием кнопки на нижней панели планшета. Колонка "Конструкции скважины" позволяет поместить на планшет колонку со схематичным изображением конструкции скважины. При построении колонки запись элементов конструкции производится в соответствующие колонки "Примитивы интервала" и "Примитивы точки". После нажатия на кнопку "Вставить колонку конструкции скважины" и указания ее положения на планшете появляется диалог настройки колонки:

1.3.24. Раздел легенды

Раздел легенды предназначен для отображения информации она значении заливок, используемых на планшете (в объектах «Заливка», «Попластовая колонка», «Двумерная кривая») (рис. 1.9).

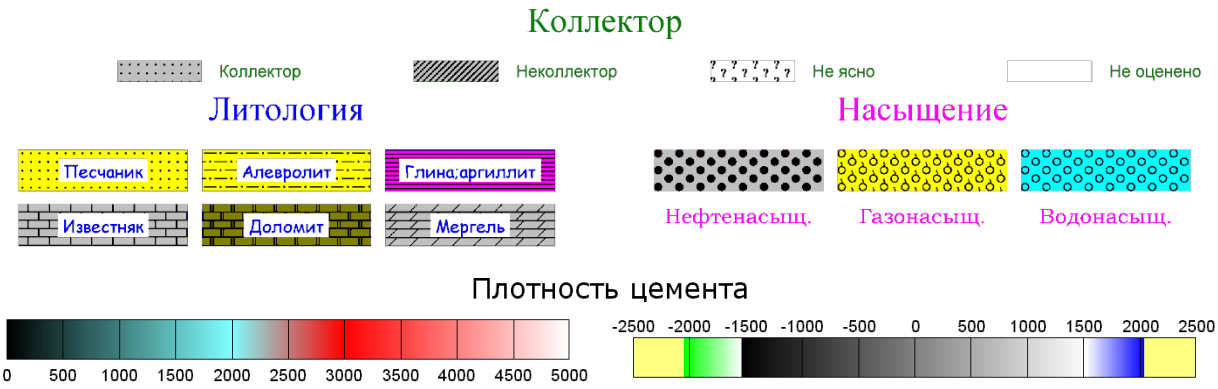


Рис.1.9. Раздел легенды планшета

Раздел состоит из нескольких прямоугольных областей, каждая из которых имеет заголовок (возможно, пустой) и примеры заливок с названиями, они же объекты легенды.

2. ОПЕРАТИВНА ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ ГИС В ПРОГРАММЕ «ПРАЙМ»

Оперативной интерпретацией называют комплексную обработку данных всех методов ГИС по разрезу одной скважины с выдачей наиболее полных сведений (литологической колонки, характера насыщения пластов, коллекторских свойств) при автоматизированной интерпретации.

Данные методов ГИС, поступающие на интерпретацию могут быть в разных форматах – LAS, LIS и т.д. Чаще всего используется формат LAS. При этом названия кривых могут иметь разные обозначения. Названия единиц измерений так же могу различаться.

2.1 Спецификация формата LAS

Формат LAS — предназначен для обмена каротажной информацией и представляет собой текстовый (ASCII) файл. Аббревиатура LAS является сокращением от Log ASCII Standard (ASCII – American Standard Code for Information Interchange). Формат Las был разработан под руководством специального комитета Канадского общества каротажников (Canadian Well Logging Society's Floppy Disk Committee) [1].

Информация в файле LAS разбита на блоки, называемые «секциями». Каждая секция начинается со строки, в которой объявляется имя секции. Такая строка должна обязательно начинаться с символа «~». Текущая секция заканчивается либо с началом новой секции, либо при достижении конца файла.

Внутри секции могут располагаться строки двух типов — «параметры» и «комментарии». Комментарии — это строки, начинающиеся с символа «#» за которым следует произвольный текст. Параметры — это строки, каждая из которых представляет один параметр.

Название секции в файле LAS определяется по первой букве, следующей за знаком «~». Порядок следования секций может меняться. Названия секций в файле определено спецификацией:

- **~V** – секция содержит версию файла и определяет режим переноса данных;
- **~W** – секция содержит информацию, идентифицирующую скважину;
- **~C** – секция содержит информацию о кривых, сохраненных в этом файле;
- **~P** – секция содержит параметры или константы (секция не обязательна);
- **~D** – секция содержит внутрискважинную информацию такую как результаты испытания пластов, интервалы перфорации, интервалы отбора керна и т.д. (секция не обязательна);
- **~O** – секция содержит дополнительную информацию, комментарии и т.д. (секция не обязательна);
- **~A** – секция содержит данные каротажа (кривые) в текстовом (ASCII) формате.

А секция обязательна, и всегда должна быть последней секцией в файле. Каждый столбец данных должен быть отделен от соседнего столбца как минимум одним пробелом.

Пример содержания файла формата LAS:

```
~VERSION
VERS.                          2.0:  CWLS LAS - VERSION 2.0
WRAP.                           NO:  One line per depth step
TYPE.                         ГИС:  Вид передаваемых данных
~Well
# MNEM.UNIT                    DATA  INFORMATION
#=====.==================: ============================================
STRT.M                 1346.00:  Начальная глубина
STOP.M                 3003.40:  Конечная глубина
STEP.M                    0.20:  Шаг квантования по глубине
NULL.                  -999.25:  Отсутствие данных
COMP.                      ОАО ГФГ:  Компания-владелец
WELL.                  UG56GU:  Скважина
FLD.          Самотлорское:  Имя месторождения
AREA.         Самотлорская:  Разведочная площадь
HOLE.                         2:  Номер ствола
CLST.                      3116:  Куст
HTYP.                  боковой:  Тип ствола
LOC.        Тюменская обл:  Регион
CTRY.                  Россия:  Страна
DATE.             20.07.2014:  Дата выполнения ГИС
SRVC.          ООО "МКГ»:  Компания, выполнившая ГИС
INTR.          Тихомирова :  Инженер-Интерпретатор
TYPE.                         ГИС:  Вид передаваемых данных
RUN.                          ВЯЗ:  Тип каротажа
~Parameter
#MNEM.UNIT          Value           Description
#======.==================:============================================
ALT   .M                  63.11:  Альтитуда
BTM   .M                 3019.0:  Начало записи
C0B   .M                       :  Глубина спуска кондуктора
C0S   .MM                      :  Диаметр кондуктора
C1S   .MM                      :  Диаметр обсадной колонны
~Curve
#============================================================================
DEPT .M                        :  Глубина
GK   .mcR/h                    :  Естественная гамма-активность по ГК
NKTb .UE                       :  ННК-т, большой зонд
NKTs .UE                       :  ННК-т, малый зонд
WS   .%                              :  Суммарное водородосодержание
        GGK  .g/cm3                  :  Объемная плотность по ГГК-П

        # DEPT     GK    NKTb  NKTs  WS  GGK
        ~Ascii Log Data
 1350.00    4.89    1.38    1.31    0.53 -999.25
 1350.20    4.91    1.40    1.25    0.50 -999.25
 1350.40    4.91    1.48    1.22    0.45 -999.25
```

```
1350.60   5.06   1.50   1.32   0.49 -999.25
1350.80   5.06   1.71   1.44   0.46 -999.25
1351.00   5.00   1.79   1.44   0.44 -999.25
```

Единого стандарта для обозначения названий данных методов ГИС и единиц измерений нет. Данные одних и тех же методов записанные на разной аппаратуре, разными программами регистрации могут быть по-разному обозначены (строчными буквами, заглавными, английскими, русскими и т. д.).

Поэтому перед обработкой данные сначала нужно привести к единому виду, чтобы программа интерпретации могла их идентифицировать. Для этого Las файл нужно импортировать в программу обработки с использованием системных словарей. Системные словари можно редактировать, добавляя данные. Названия и обозначения некоторых методов ГИС приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Названия и обозначения некоторых методов ГИС

Метод	Расшифровка названия	Обозначение
ГК	Гамма каротаж	ГК, GR, GR
ПС	Спонтанная (естественная) поляризация	ПС, SP, PS
НК	Нейтронный каротаж	НК, JB, NKT, NLT
МГЗ	Микроградиент зонд	МГЗ, MGZ, MZG
МПЗ	Микропотенциал зонд	МПЗ, MPZ, MZP
БК	Боковой каротаж	БК_N, BK, LLD
ИК	Индукционный каротаж	IL, ILD,
БКЗ	Боковое каротажное зондирование	KS1-KS5, GZ1-GZ5
АК	Акустический каротаж	АК, DT
КМ	Кавернометрия	CALI, DS
ГГКп		RHOZ, RHO8, RHOI, RHOB, ROBB

2.2 ПЕТРОФИЗИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МЕТОДИКИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ

Оценка емкостных характеристик пород и типа коллекторов проводится путем количественной интерпретации данных ГИС и требует наличия соответствующего петрофизического обеспечения.

Базирующаяся на петрофизическом обосновании количественная интерпретация данных ГИС включает установление типов (классов) изучаемых коллекторов, выбор физических моделей, определение для выбранных моделей совокупности петрофизических связей между измеряемыми геофизическими параметрами и искомыми коллекторскими свойствами. Для этого требуется определение по возможности на одних и тех же образцах керна литологического состава пород, их емкостных и фильтрационных свойств, свойств насыщающих флюидов и основных физических свойств, измеряемых геофизическими методами – удельного электрического сопротивления, интервального времени распространения упругой волны, плотности, естественной радиоактивности, диффузионно-адсорбционной активности, ядерно-магнитных свойств. Специальные исследования по измерению фазовой и относительной проницаемости, остаточной водо- и нефтенасыщенности, минерализации пластовых вод и т.п. выполняются в меньшем объеме. Петрофизическое обеспечение необходимо выполнять на образцах керна из первых скважин, пробуренных на месторождении. Керн целесообразно отбирать небольшими интервалами, но с обеспечением полного выноса. Это необходимо для сопоставления между собой значений коллекторских

свойств, измеренных на керне и найденных по материалам ГИС, контроля достоверности выполненных определений.

2.3 СОЗДАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ И РАБОЧЕГО ПЛАНШЕТА

Система ПРАЙМ предназначена для работы с разнородной по типу и составу информацией. Чтобы не зависеть от форматов исходной информации система использует собственную локальную базу данных, которая носит название **WS** (от англ. «work space» - «рабочая область»). Основой **WS-технологии** является управление данными при помощи метабазы и реализация Системы в виде ядра и приложений. WS – файл состоит из таблиц, самые распространенные из которых:

- Таблицы исходных кривых – LAS, ИНГИС и др. (по названию формата)
- Таблица результирующих непрерывных кривых PCURVE
- Таблица результирующих попластовых кривых – HCURVE
- Таблица стратиграфических разбивок – Стратиграфия
- Таблицы попластовых колонок – Коллектор, Литология и др.
- Таблица ПЛАНШЕТ. Планшетов в ней может быть один или несколько.

Планшет представляет собой рабочий стол пользователя системой. Планшет может содержать как исходные данные, так и результаты интерпретации. Некоторые планшеты являются статическими, т.е. практически не изменяются с момента создания.

Другие могут быть динамическими, т.е. их содержание изменяется в процессе работы с данными ГИС.

Для создания новой базы данных и рабочего планшета запустите программу ПРАЙМ из меню «**Пуск**» или с рабочего стола, нажав на иконку 

.

Создайте новый файл из меню - «**Файл**» -/- «**Создать**» (рис. 2.1).

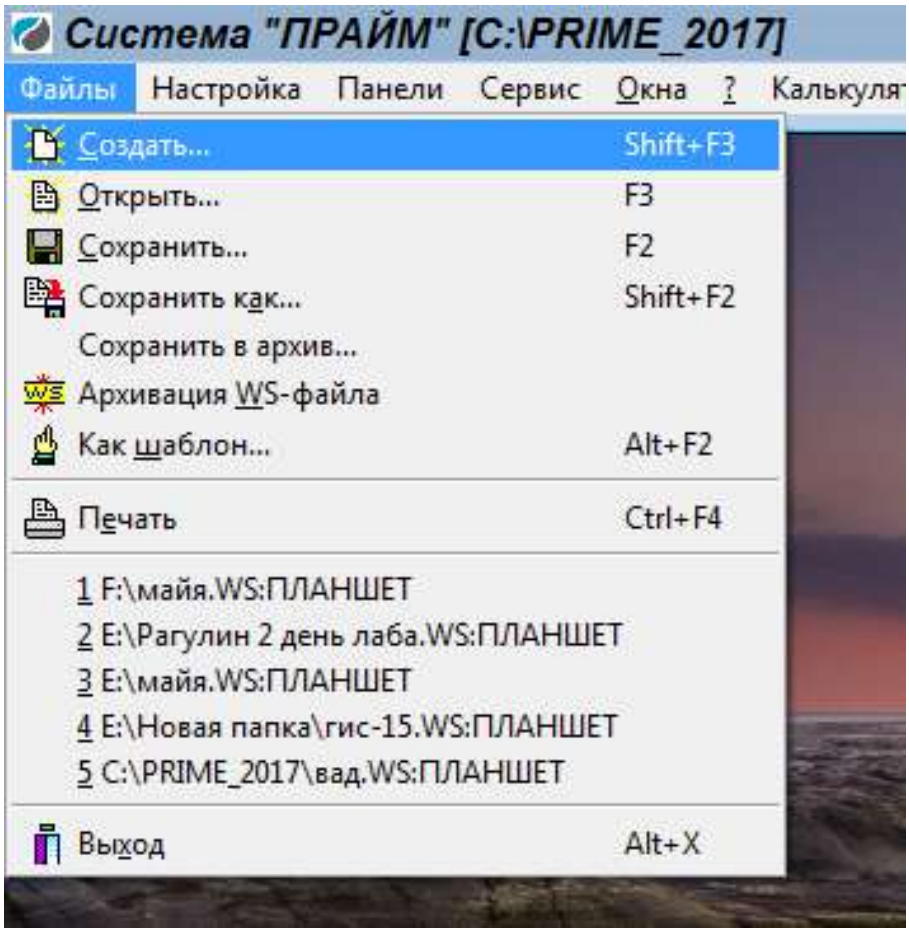


Рис. 2.1 Создание файла обработки

Программа запросит файл шаблона (ранее обработанный планшет и сохраненный как образец обработки). Если шаблона нет, нажмите кнопку «**Пропустить**» (рис. 2.2).

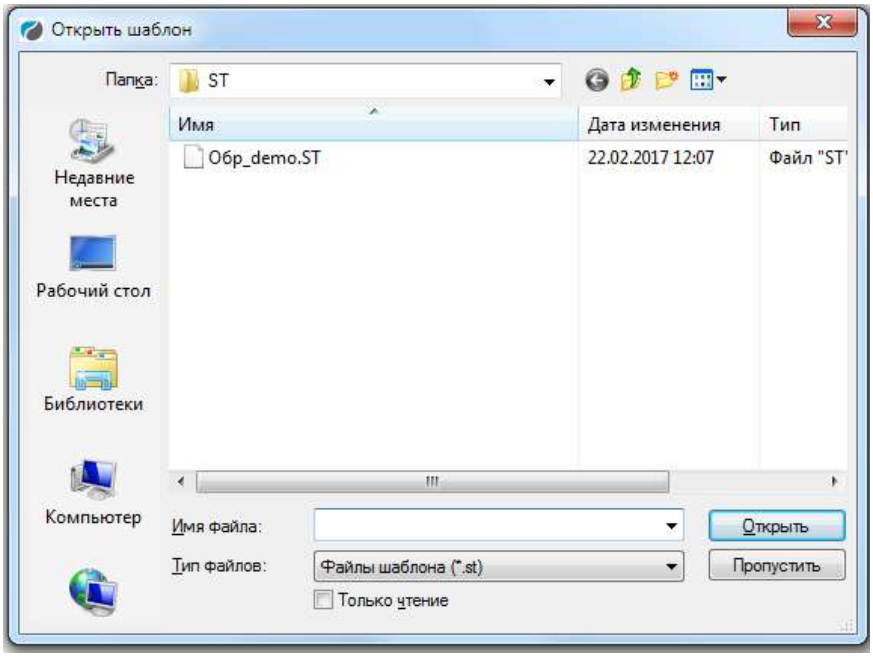


Рис. 2.2 Окно выбора шаблона планшета

Программа предложит выбор рабочей области (базы данных файл с расширением *.ws). Для создания новой базы введите название в поле «Имя файла» и нажмите кнопку «Открыть» (рис. 2.3).

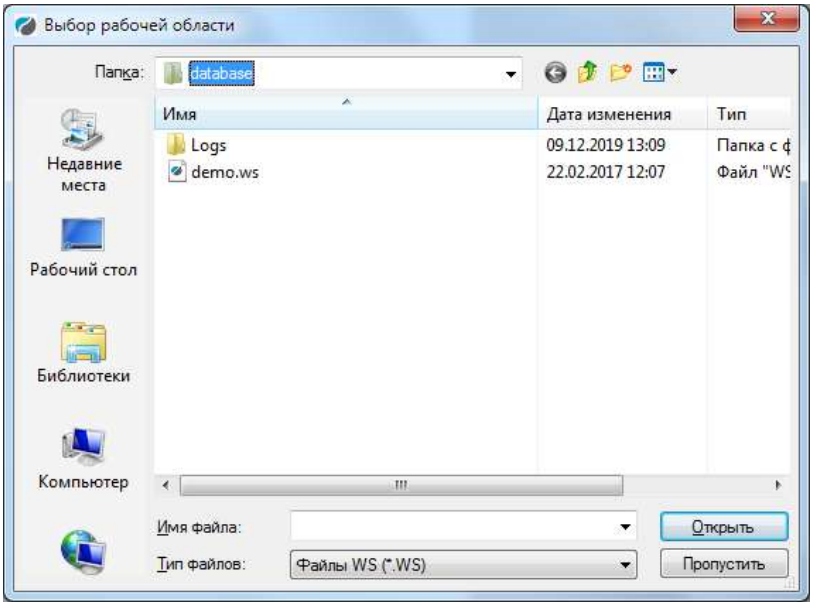


Рис. 2.3 Окно выбора базы данных

На экране откроется созданный планшет.

2.4 НАСТРОЙКА ПЛАНШЕТА

Перед импортом кривых ГИС настройте планшет. Вставите необходимое количество полей. Вставка объектов производится из панели инструментов программы (пункт 1.3.11). По умолчанию планшет создается с колонкой глубин и одним линейным полем. Щелкните два раза по сетке линейного поля и удалите его, нажав клавишу «Del». Нажмите в панели кнопку для вставки линейного поля. Наведите курсор мышки на свободное пространство планшета. Появится синяя черта и отметка текущей позиции курсора (рис. 2.4).

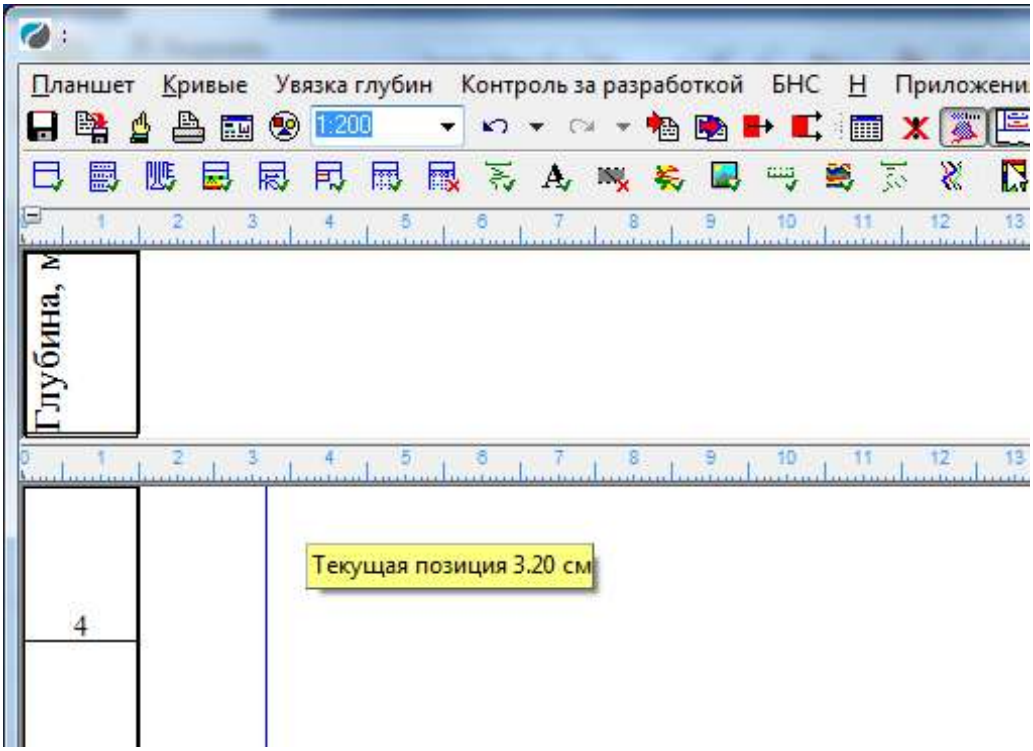


Рис. 2.4 Вставка поля в планшет

Черкните левой кнопкой мышки справа от колонки глубин в произвольном месте. Установится левая граница поля. Переместите

курсор в права. По желтому окошку позиции установите нужную ширину поля (рис. 2.5).

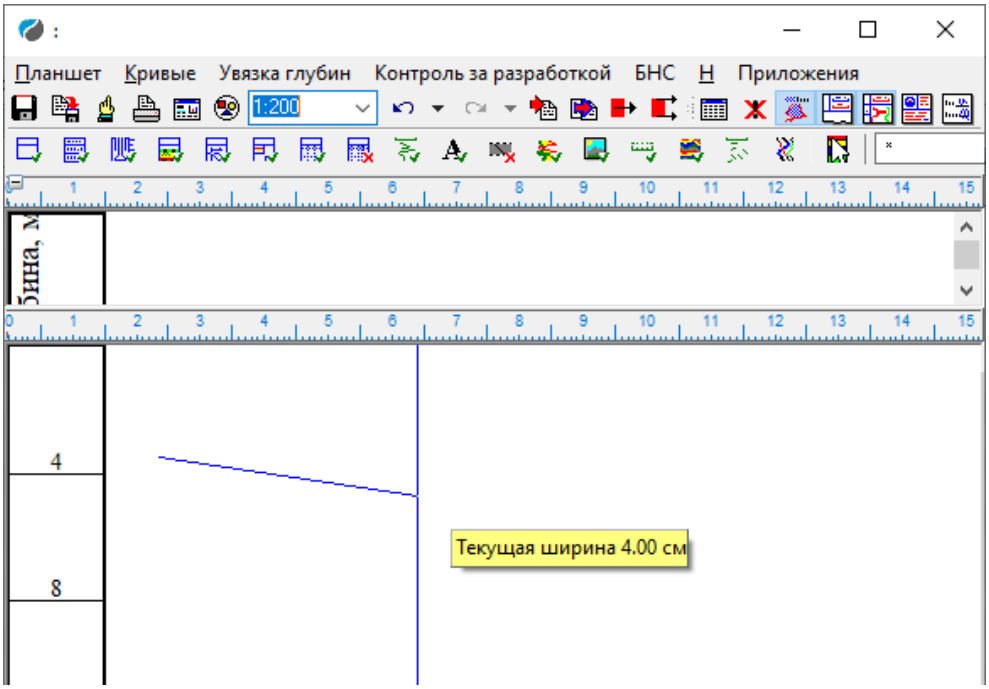


Рис 2.5 Настройка ширины поля

Нажмите левую кнопку мышки еще раз. Поле сформируется и автоматически сместится вплотную в колонке глубин. Аналогичным образом вставьте нужное количество полей.

ВАЖНО!!! После вставки объекта для выхода из режима вставки нажмите клавишу Esc!

Вставка в планшет логарифмического поля производится кнопкой -  .

Чтобы изменить положение вертикальных границ поля нажмите и удерживайте на клавиатуре Клавишу «Ctrl» и подвести курсор к границе, пока не появится двойная стрелка (рис. 2.6). Щелкните левой кнопкой мыши и отпустите клавишу «Ctrl». Измените положение границы как надо.

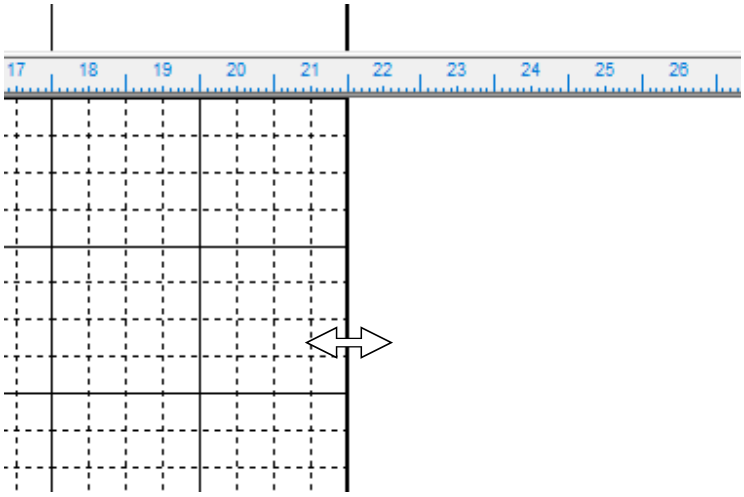


Рис. 2.6 Редактирование вертикальных границ

Чтобы перенести все поле удерживайте клавишу «Alt» и ухватив мышкой поле за сетку переместите его.

Свойство любого объекта планшета можно вызвать, кликнув по нему правой кнопкой мыши. Ширину объекта можно менять из окна свойств («начало» и «ширина»).

Логарифмическое поле является не редактируемы. Его свойство изменить будет нельзя! Поэтому вставляйте поле сразу нужной ширины.

Вставка в планшет колонок «Литология», «Коллектор» и «Насыщение» производится кнопкой  из панели инструментов.

Подготовьте в планшете следующие поля:

1. ГК, ПС (линейное поле 4 см);
2. НК (линейное поле 4 см);
3. Двойные разностные параметры (линейное поле 4 см);
4. МГЗ, МПЗ если есть (линейное поле 4 см);
5. БК, ИК (линейное поле 4 см)
6. БКЗ (логарифмическое поле 4 см);

7. Пористость (линейное поле 2 см);
8. Глинистость (линейное поле 2 см);
9. УЭС пласта (линейное поле 2 см);
10. Колонка литологии (колонка литологий 1.5 см);
11. Колонка коллектор (колонка литологий 1.5 см);
12. Колонка насыщение (колонка литологий 1.5 см);
13. Нефте, водонасыщенность (линейное поле 4 см);
14. Поле флюидной модели (линейное поле 1.5 см).

Сохраните планшет и базу данных «**Планшет**» / «**Сохранить**». Задайте название для базы данных и планшета в базе.

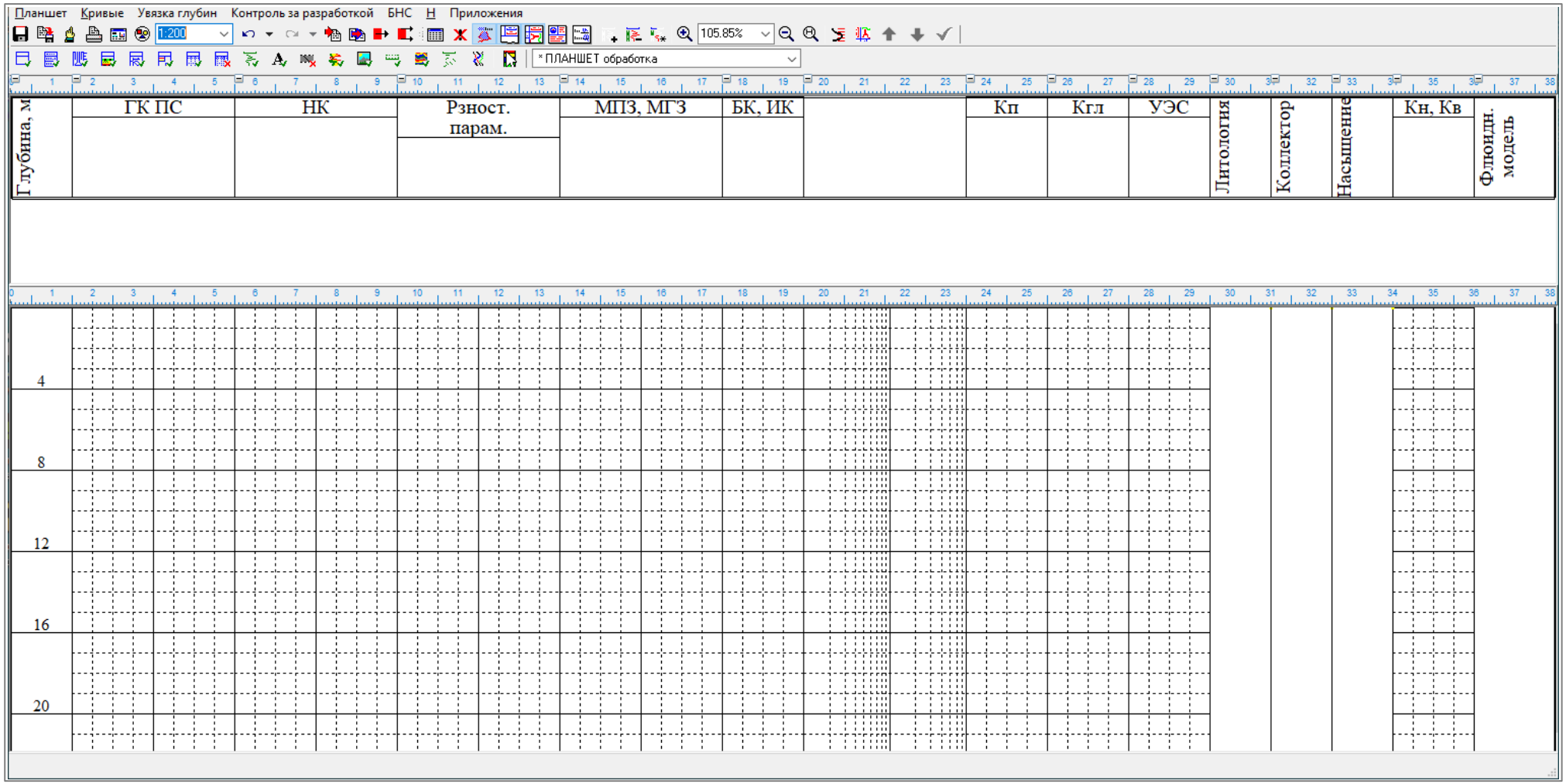


Рис. 2.7. Подготовленный планшет

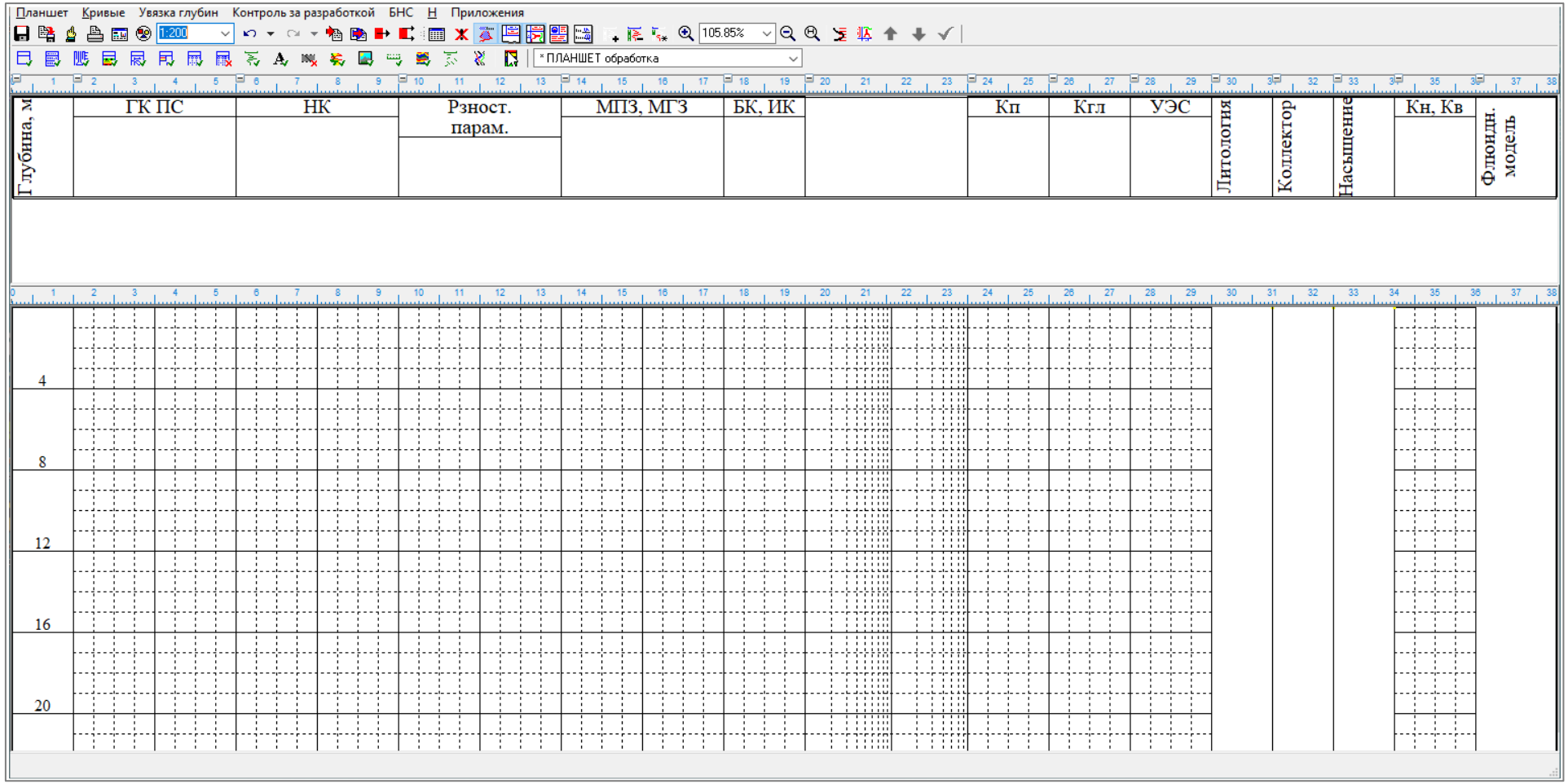


Рис. 2.7. Подготовленный планшет

2.5 ИМПОРТ КРИВЫХ

Перед импортом кривых выберите пункт меню «**Импорт**» / «**Параметры импорт LAS**». В открывшемся окне откройте вкладку «Словари» и проверьте подключены ли системные словари «Для имен полей» и для «Для ед. измерения» (рис. 2.8.).

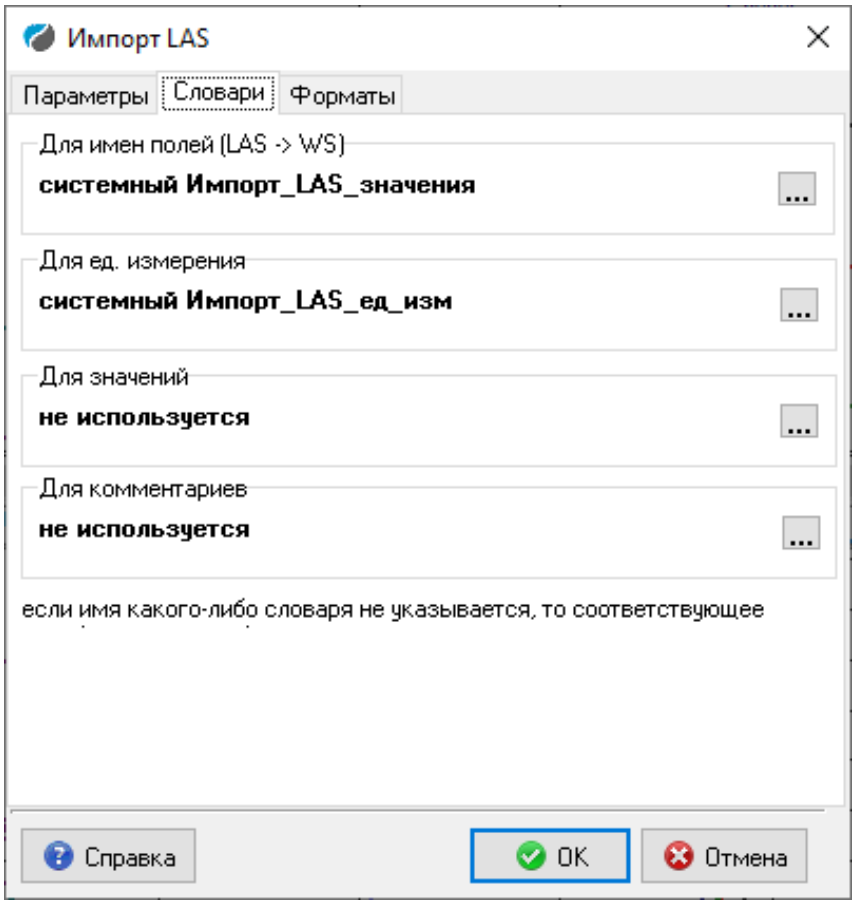


Рис. 2.8. Выбор системных словарей

Если словари не используются подключите их, нажав кнопку ... Установите переключатель в положение «Системный словарь» и из выпадающего списка выберите пункт «Импорт_LAS_значения» для имен полей и «Импорт_LAS_ед_изм» для единиц измерений (рисунок 2.9.).

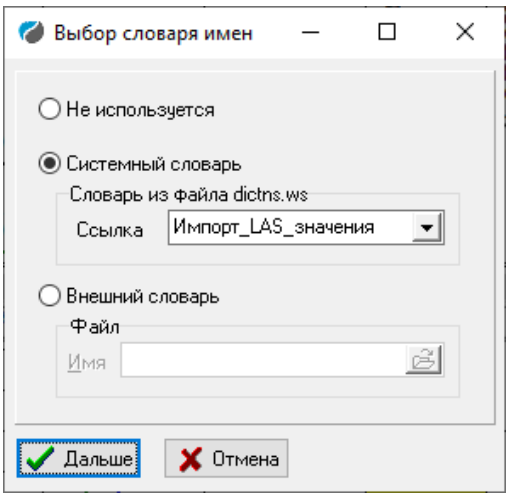


Рис. 2.9. Окно выбора словаря

Чтобы просмотреть или отредактировать словари, два раза щелкните мышкой по их названию в окне «Импорт LAS» (рисунок 2.10.).

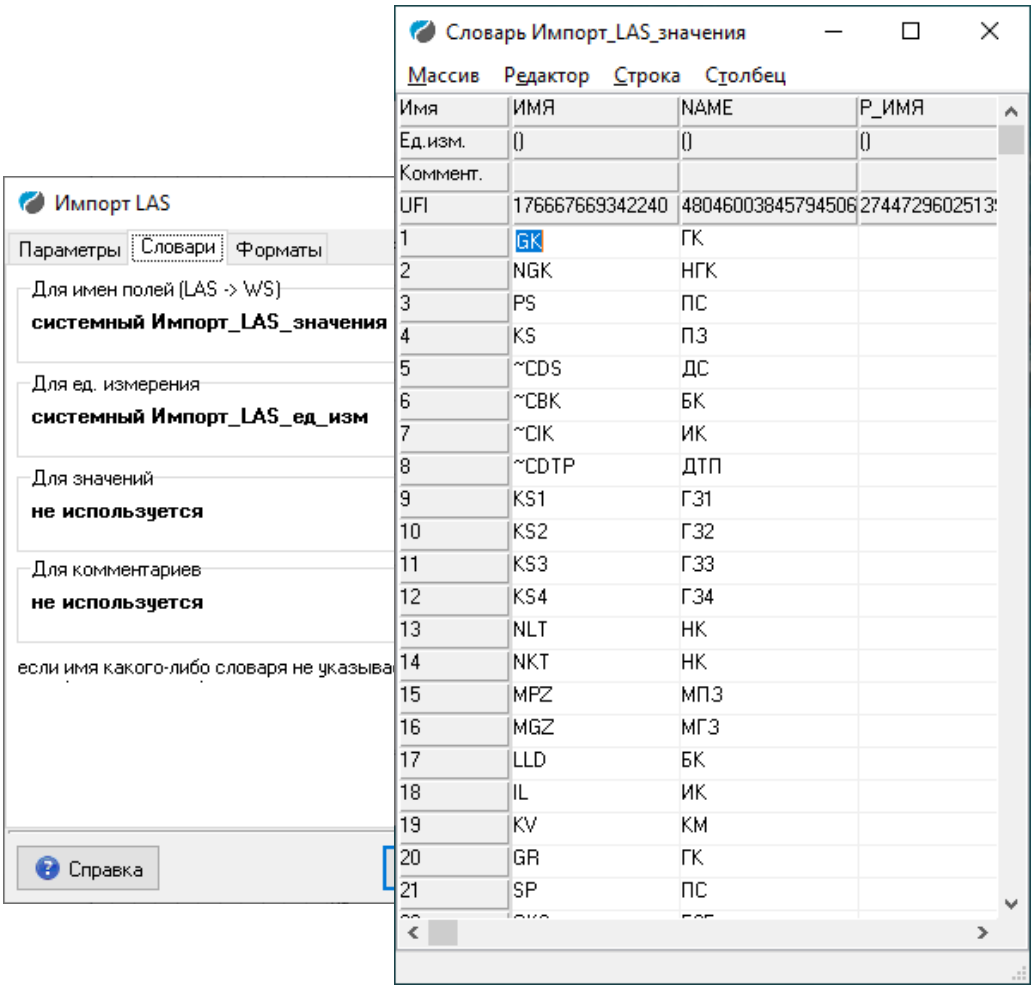


Рис. 2.10. Редактирование системного словаря

Для импорта кривых выберите пункт меню «**Импорт**» / «**Импорт LAS файл**» (рис. 2.11).

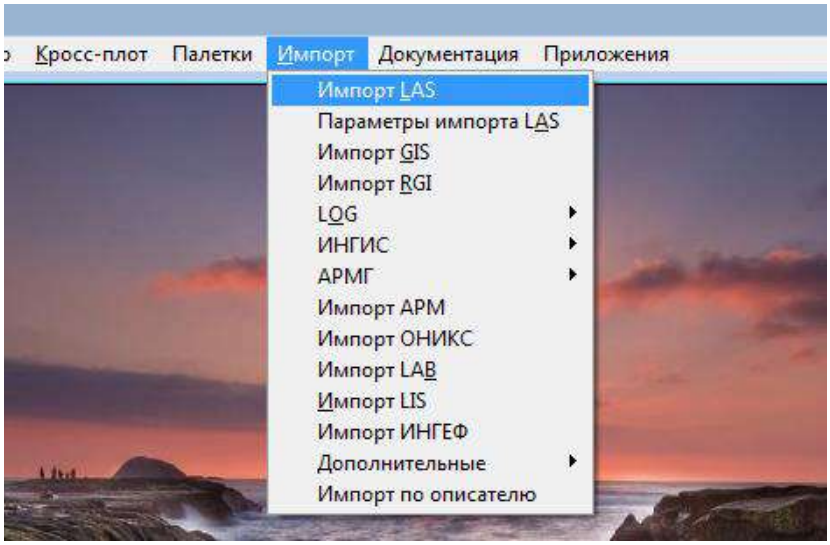


Рис. 2.11. «Импорт LAS»

Кривые запишутся в базу данных.

Посмотреть список всех кривых можно нажав клавишу «Пробел» в окне объектов планшета, на вкладке «Объекты WS» (рис. 2.12).

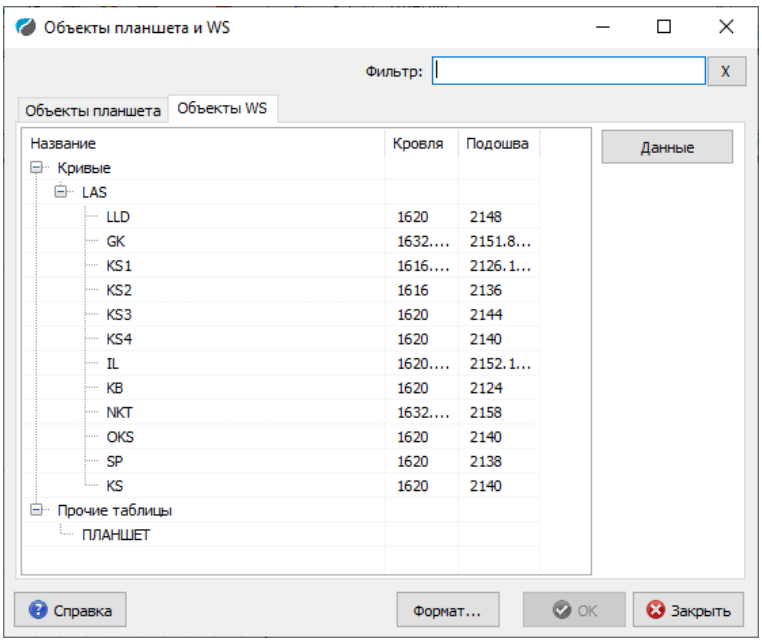


Рис. 2.912 Список объектов планшета

Список кривых на планшете можно посмотреть можно из меню «**Кривые**» / «**Список кривых**» (рис. 2.13.).

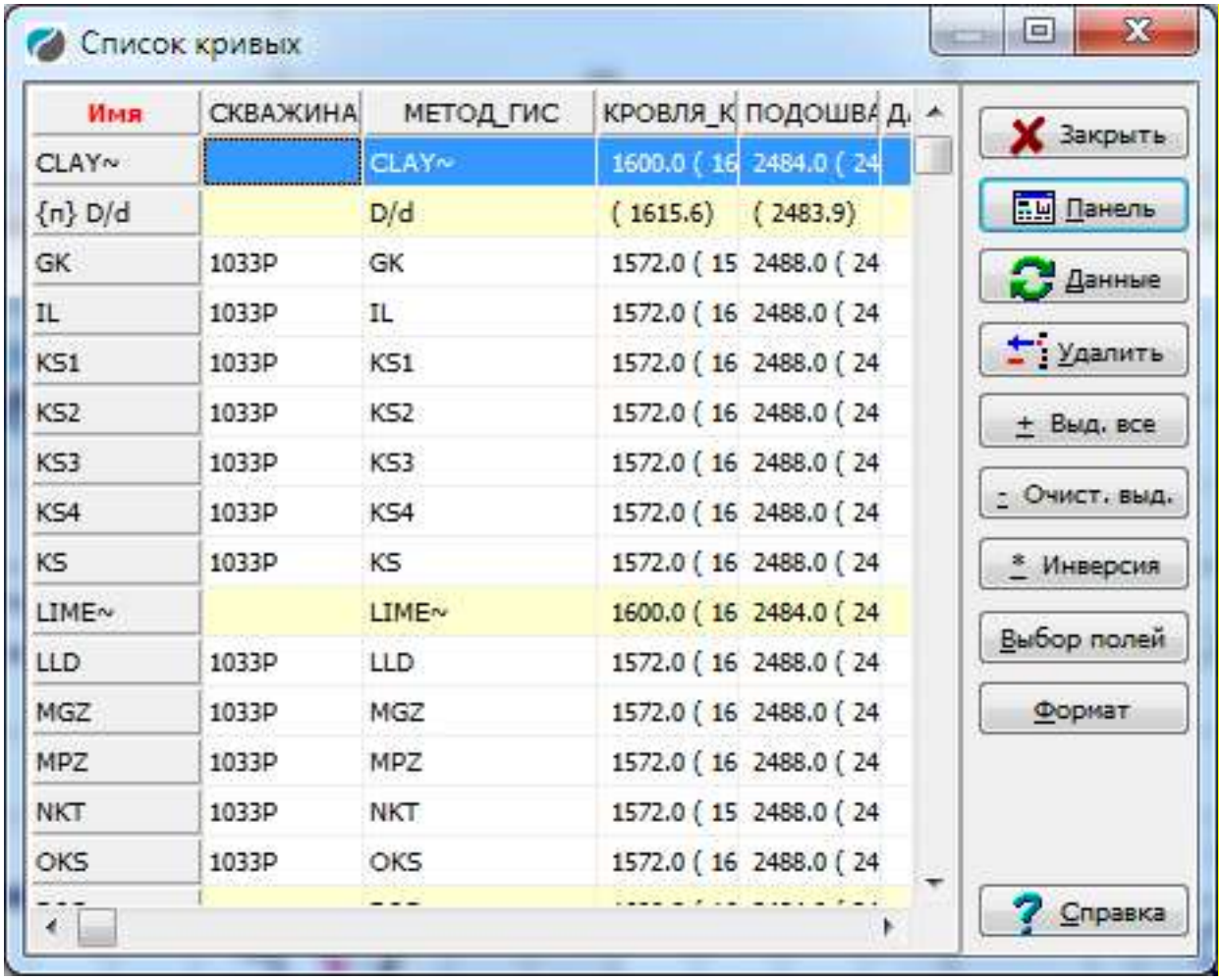


Рис. 2.13. Список кривых планшета

2.6 ВСТАВКА КРИВЫХ В ПЛАНШЕТ

Для вставки кривых в планшет нажмите кнопку  в панели инструментов. Откроется окно выбора кривых для вставки (рис. 2.14)

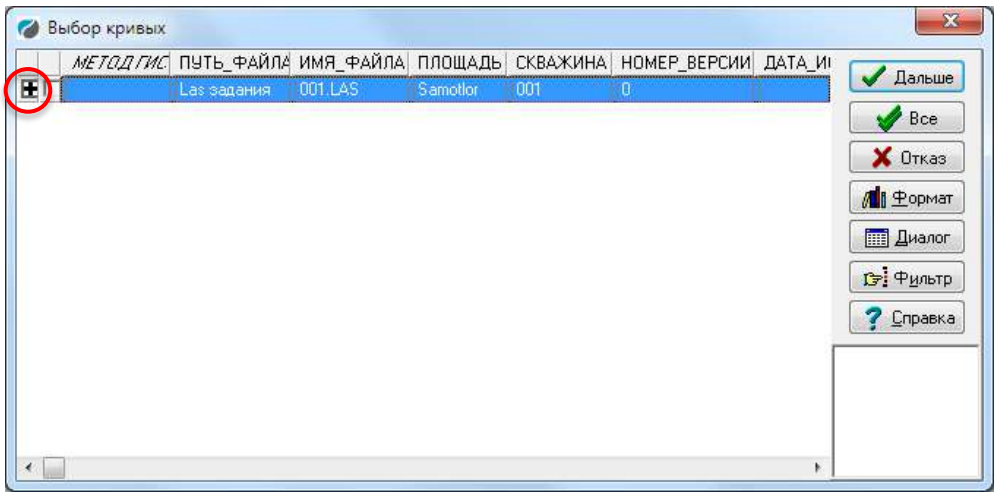


Рис. 2.14. Окно выбора кривых

Нажмите на «плюсик» в верхнем левом углу окна. Откроется список кривых. Галочками отметьте кривые, которые вы хотите вставить в планшет. Кривые можно вставить все разом или по одной.

Нажмите кнопку «Дальше» и вставите кривые в заранее подготовленные поля произвольно указав начало отсчета кривой (синяя линия) затем конец отсчета (рис. 2.15). ***Важно! Не перепутайте положение начала и конца отсчета, иначе кривая будет не корректно отображаться в планшете.***

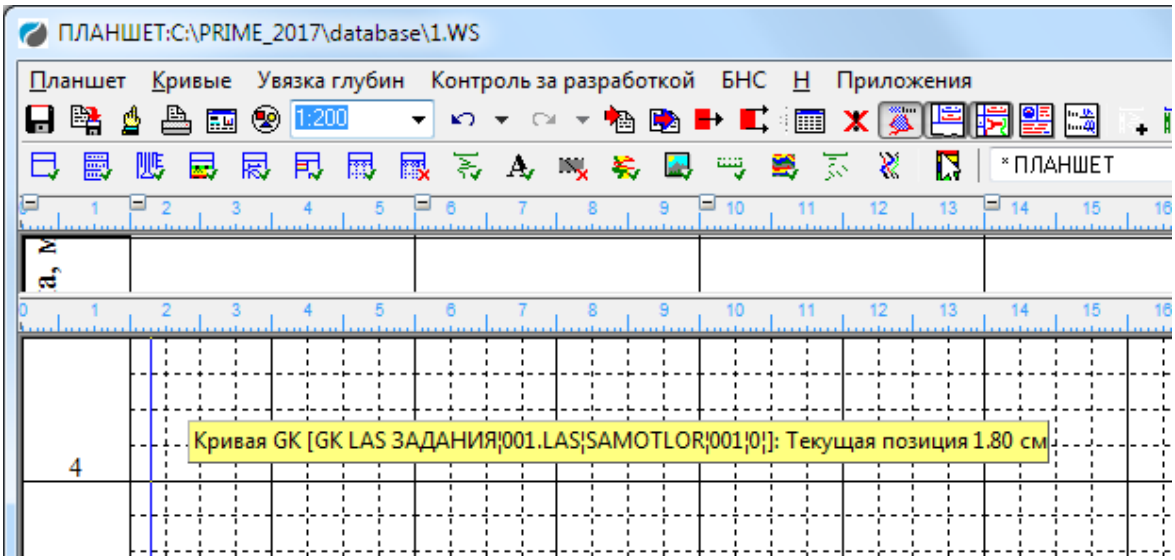


Рис. 2.15. Вставка кривой в планшет

Кривые ГК, ПС, НК, ИК, БК и МПЗ вставьте в линейные поля, а БКЗ в логарифмическое (рис. 2.16).

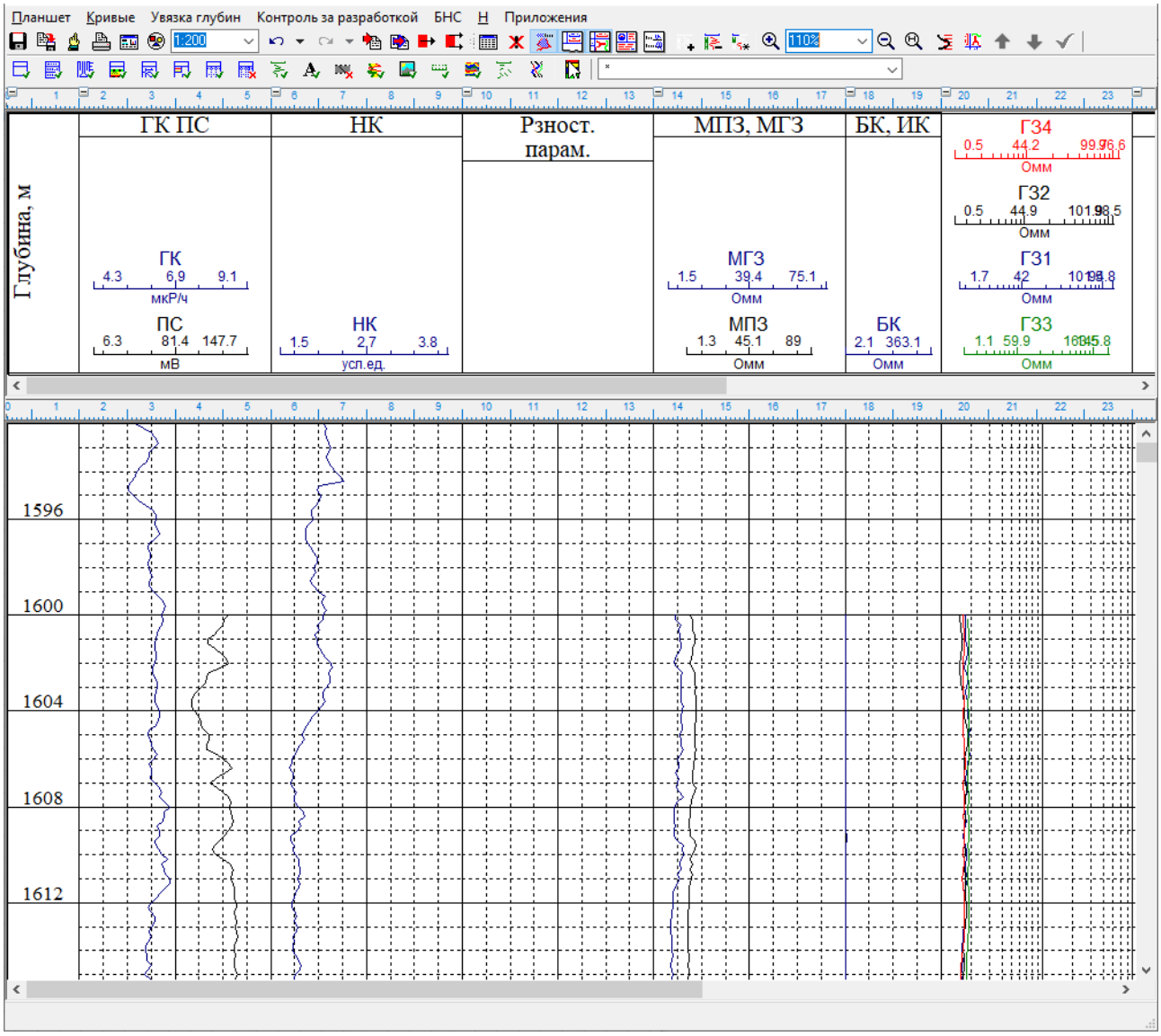


Рис. 2.16. Пример подготовленного планшета

Цвет кривых выбирается программой произвольно. Сами кривые пока не привязаны к сетке полей.

2.7 НАСТРОЙКА КРИВЫХ

Настройте положение вид и масштаб кривых на планшете.

Чтобы привязать масштаб кривых к сетке, ухватите мышкой название кривой в шапке и с нажатой клавишей «ALT» стащите кривую на поле.

Откройте окно свойств кривой, щелкнув по ней правой кнопкой мыши (рис. 2.17).

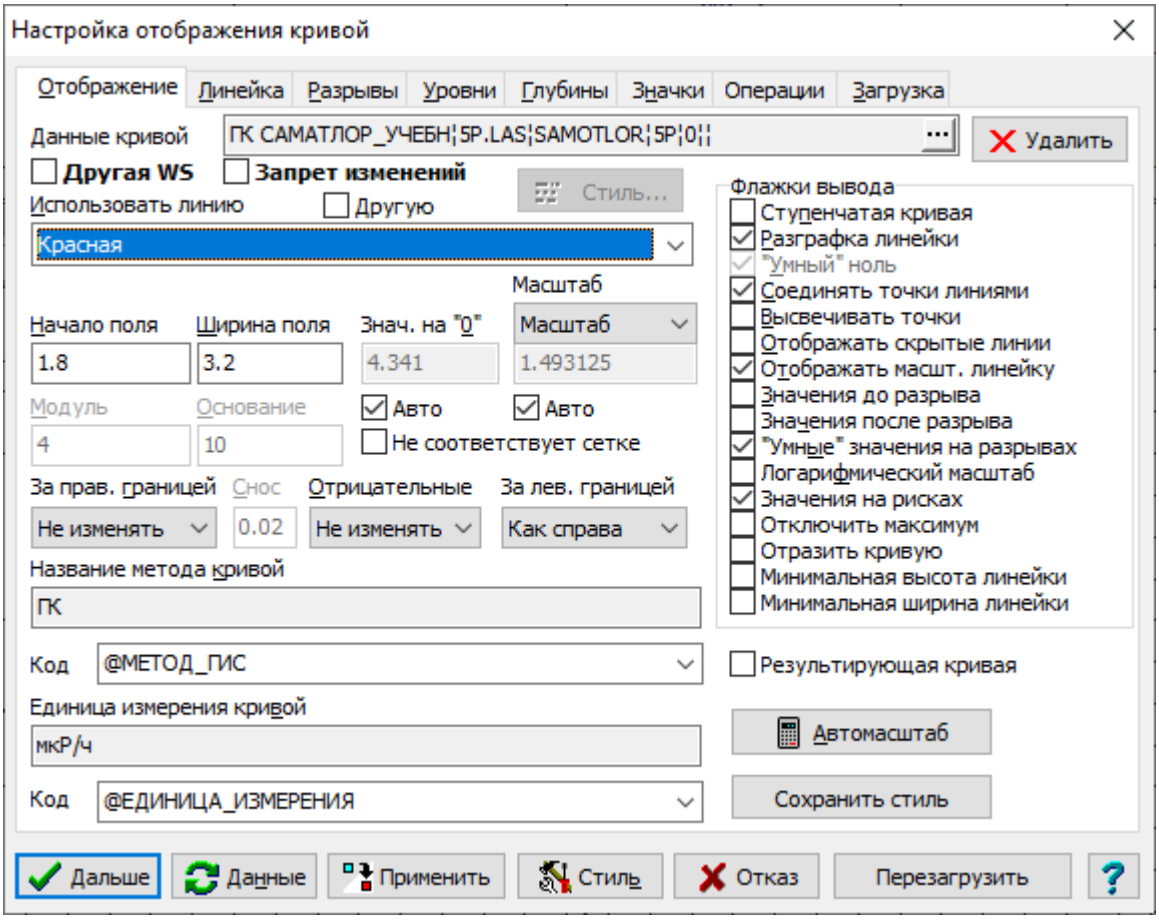


Рис. 2.17 Окно свойств кривой

Настройте цвет, толщину и масштаб кривой. Если авто масштабирование сработало не корректно, то подберите масштаб вручную таким образом, чтобы кривая изменялась через все поле от начала до конца.

Задать максимальное значение для кривой можно, сняв галочку «Авто» и выбрав в выпадающем списке «Масштаб» пункт «Значения справа» (рис. 2.18).

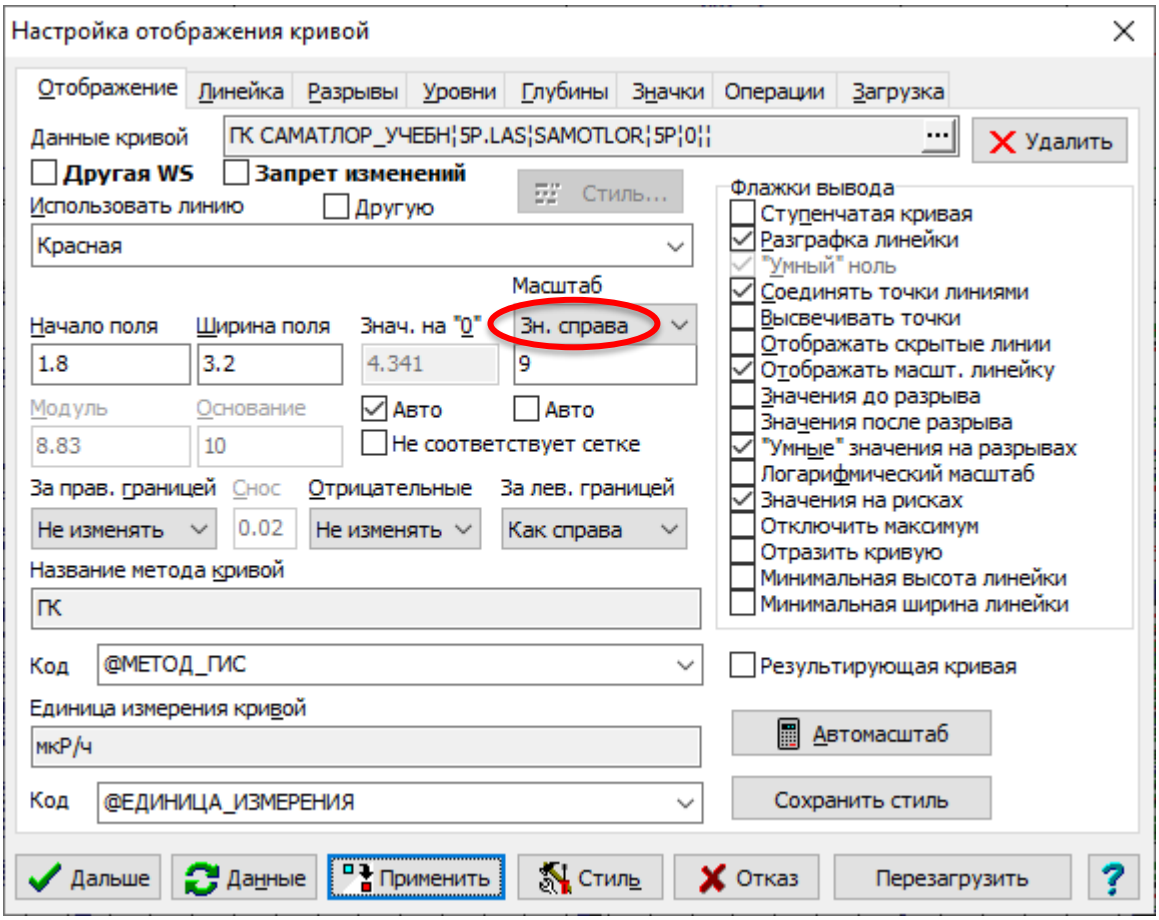


Рис. 2.18. Настройка масштаба

Для того, чтобы применить одинаковый масштаб для кривых достаточно их перетащить, удерживая клавишу «ALT» на название уже настроенной кривой.

Если кривые выходят за пределы поля настройте правила изменения кривой за границами поля (рис. 2.19).

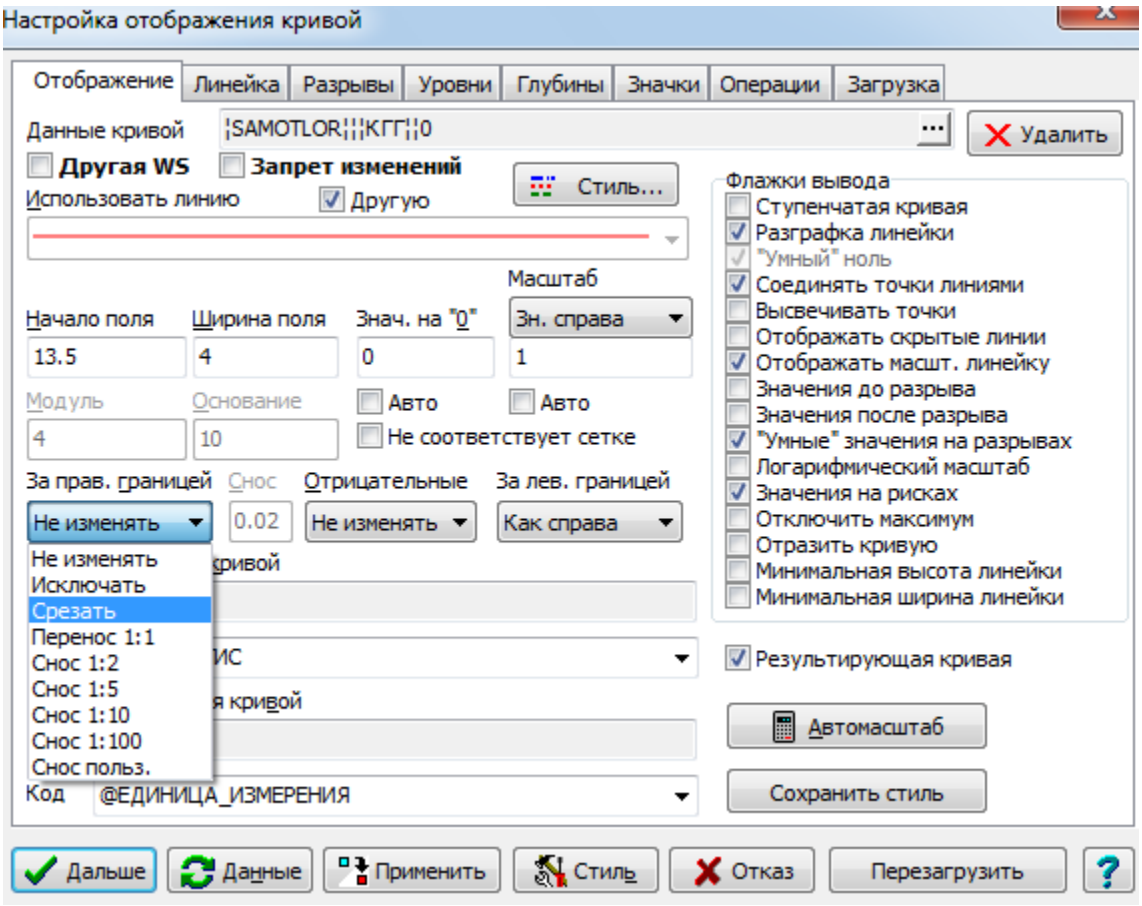


Рис. 2.19 Выбор изменения кривой за границами поля.

Изменить положение названий кривых в разделе линеек можно при помощи кнопок «Вверх», «Вниз» в панели инструментов (рис. 2.20). Для перемещения кривую нужно выделить.



Рис. 2.20. Кнопки перемещения названий кривых

2.8 ВСТАВКА ЗАЛИВОК

Если в планшете имеются кривые микробокового каротажа между ними можно вставить заливку для визуально выделения

коллекторов (превышение показаний МПЗ над МГЗ является прямым признаком коллектора).

Для этого установите масштаб от 0 до 30 для кривых микробокового каротажа – МПЗ, МГЗ.

Нажмите кнопку вставка заливки  . Укажите кривую, от которой будет применена заливка (левая кривая) – МГЗ и нажмите «галочку». Укажите кривую, до которой будет применена заливка (правая кривая) – МПЗ и нажмите «галочку». Заливка вставится на планшет (рис. 2.21). Поменять её цвет можно вызвав окно свойств, щелкнув по ней правой кнопкой мышки.

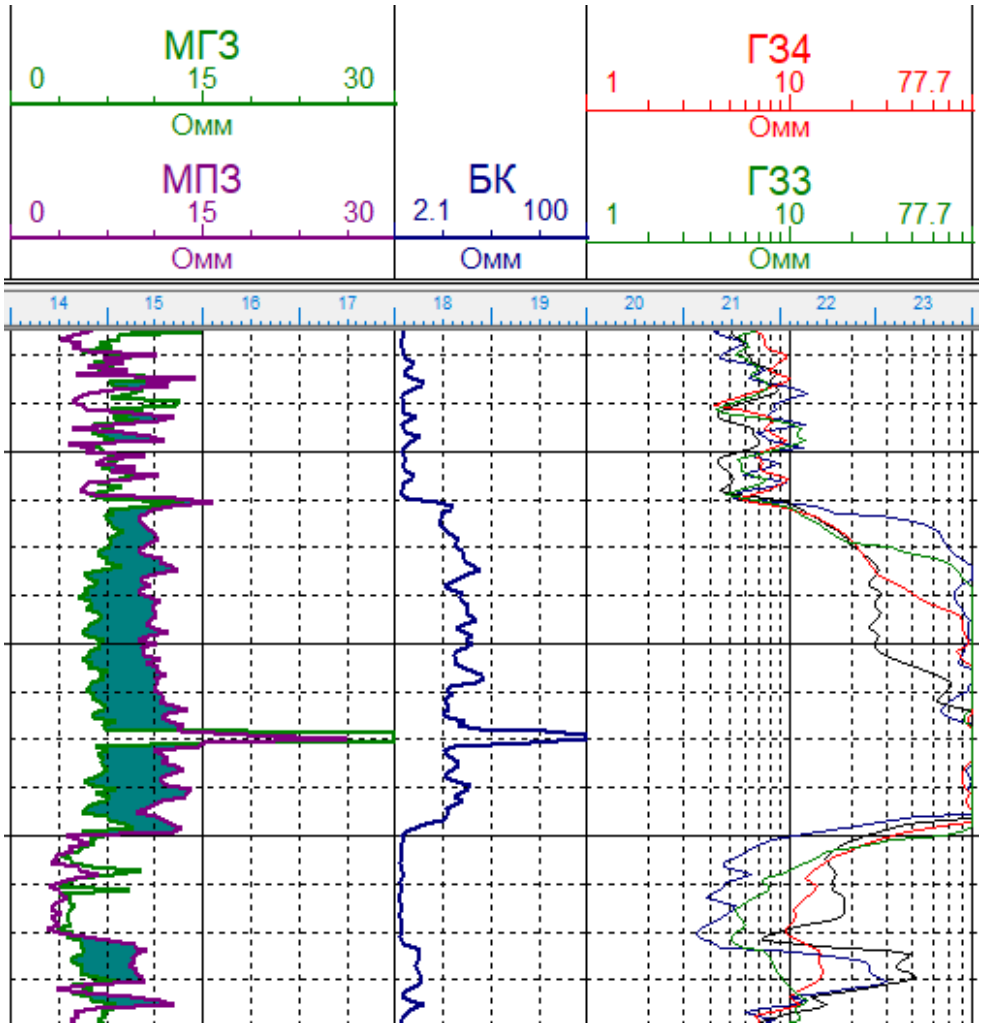


Рис.2.21. Вставка заливки

Если кривые начинаются или заканчиваются на разных глубинах откройте окно параметров планшета кнопкой  в панели инструментов и установите новое значение кровли и подошва планшета, где присутствуют все кривые (рис. 2.22).

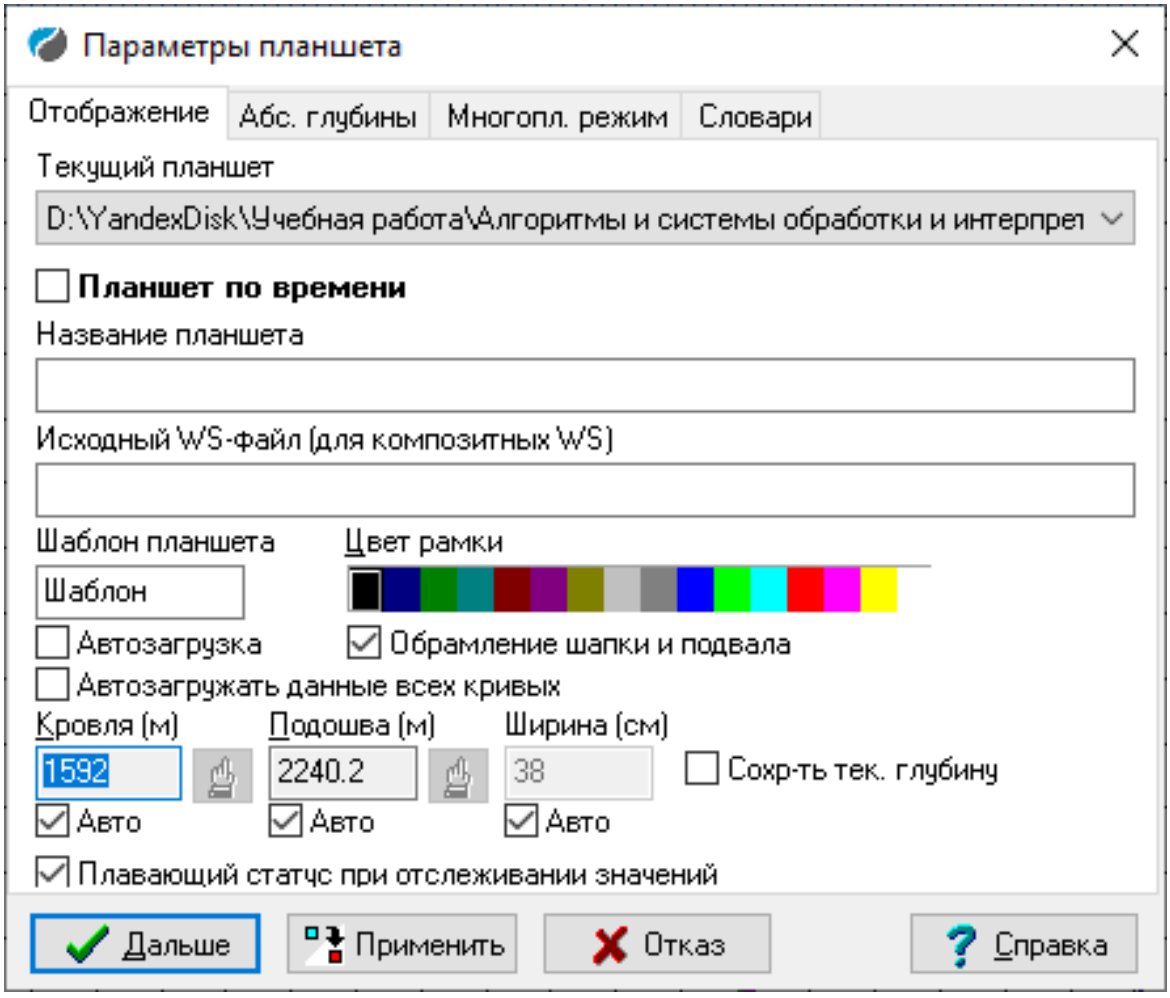


Рис. 2.22. Окно параметров планшета

2.9 РАСЧЕТ ДВОЙНОГО РАЗНОСТНОГО ПАРАМЕТРА ПО МЕТОДУ ПС

Для расчёта двойного разностного параметр Апс ($\alpha_{пс}$) по методу ПС откройте пункт меню «**БНС** (Библиотека не обсаженного

ствола)» / «**Ввод поправок**» / «**Расчет двойного разностного параметра ПС**» (рис. 2.23).

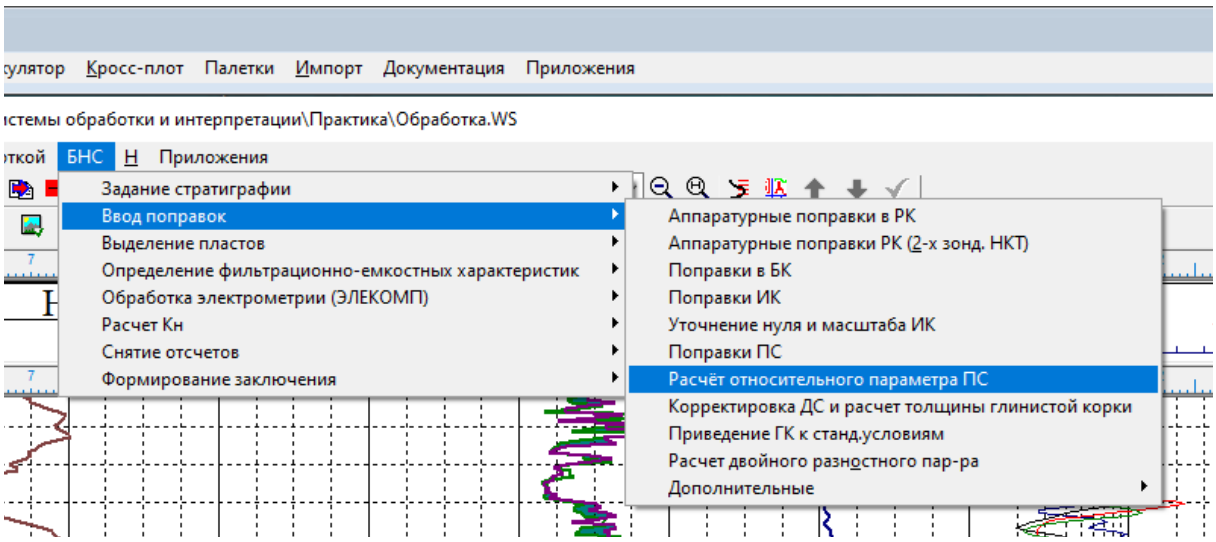


Рис. 2.23. Расчет двойного разностного параметра Апс

В открывшемся окне выберите интервал обработки «Авто» (рис. 2.24).

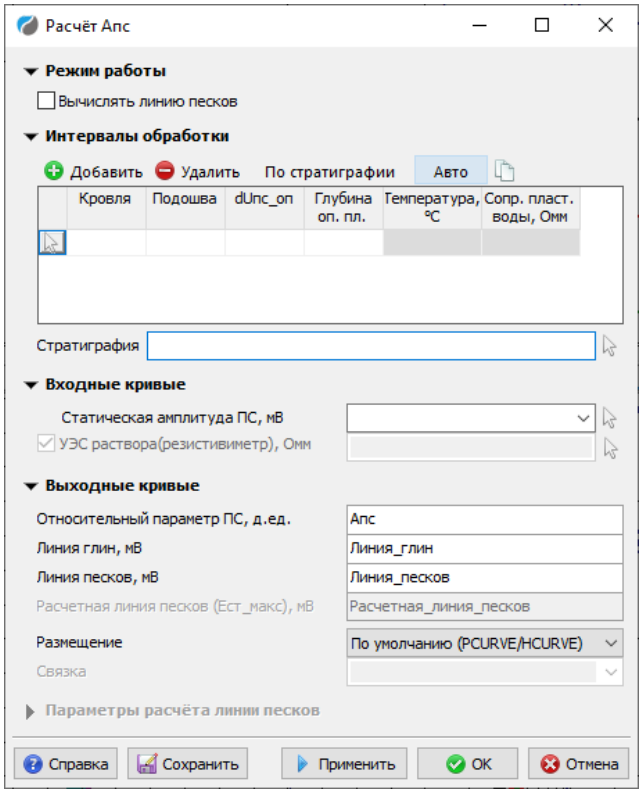


Рис. 2.24. Автоматическое определение интервала обработки

Программа перейдет на планшет и попросит выбрать кривую ПС. После выбора нажмите «галочку». Программа попроси вставить кривую Апс в планшет. Вставите ее в поле «Дв. Разностн. Парам» (поле№ 3). После этого программа перейдет в режим интерактивного редактирования «Линии глин» и «Линии песчаников» (рис. 2.25.).

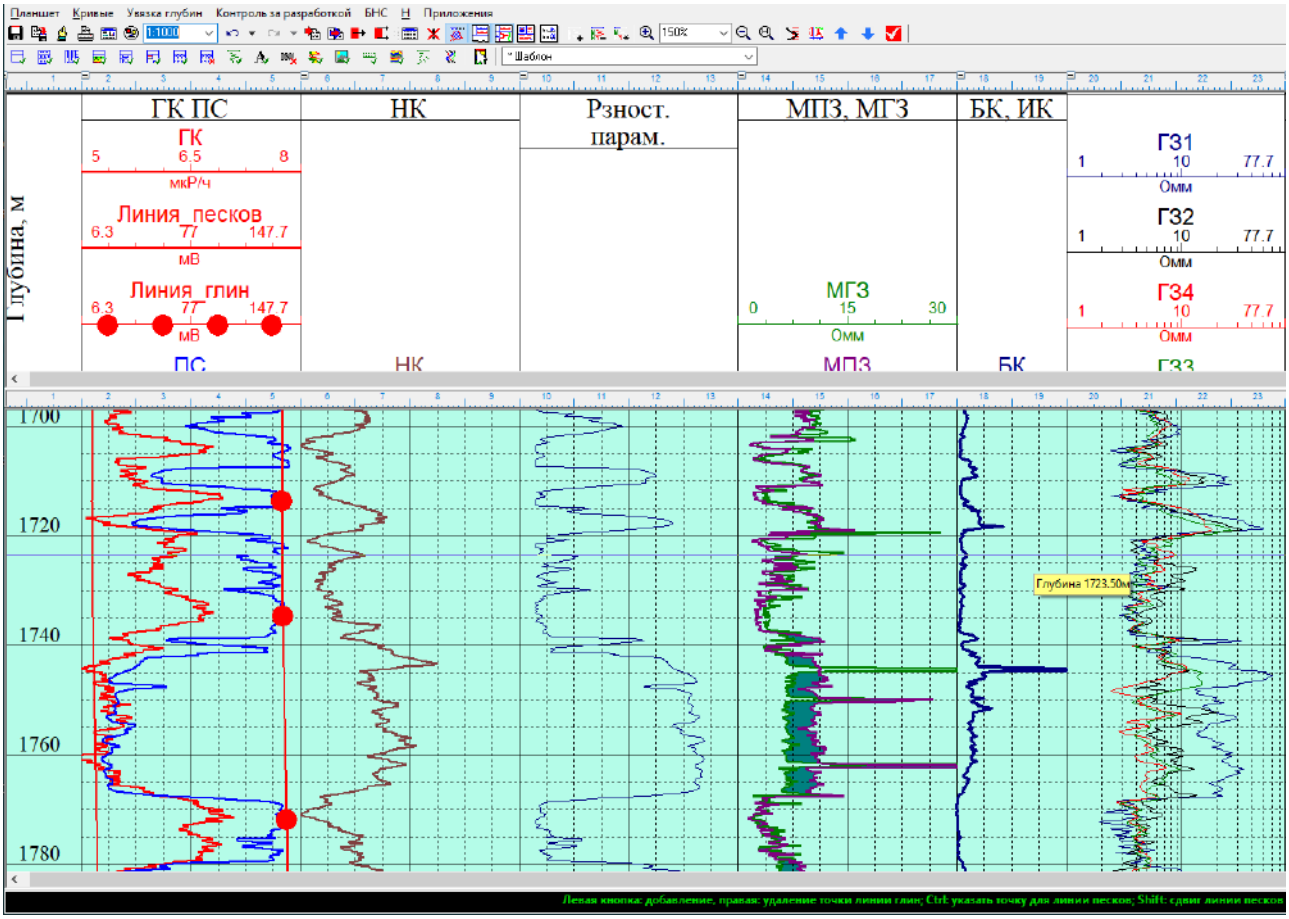


Рис. 2.25. Корректировка линии глин и линии песчаников

Линию глин можно корректировать, добавляя или убирая точки. Правая кнопка мыши добавляет точки, левая убирает. Нажав на точку левой кнопкой мышки можно менять её положение на планшете. Линию песчаников редактировать нельзя, можно только передвигать ее параллельно линии глин, нажав и удерживая кнопку «Shift». Чтобы

закончить корректировку нажмите клавишу «Esc» или «галочку». Программа вернется в окно расчёта кривой Апс. Нажмите кнопку «Ок».

Настройте цвет и толщину кривой Апс. Масштаб задайте от 0 до 1. В окне свойств кривое выберете единицы измерения кривой – «д.е» (рис 2.26). Вспомогательные кривые «Линия глин» и «Линия песков» можно удалить с планшета.

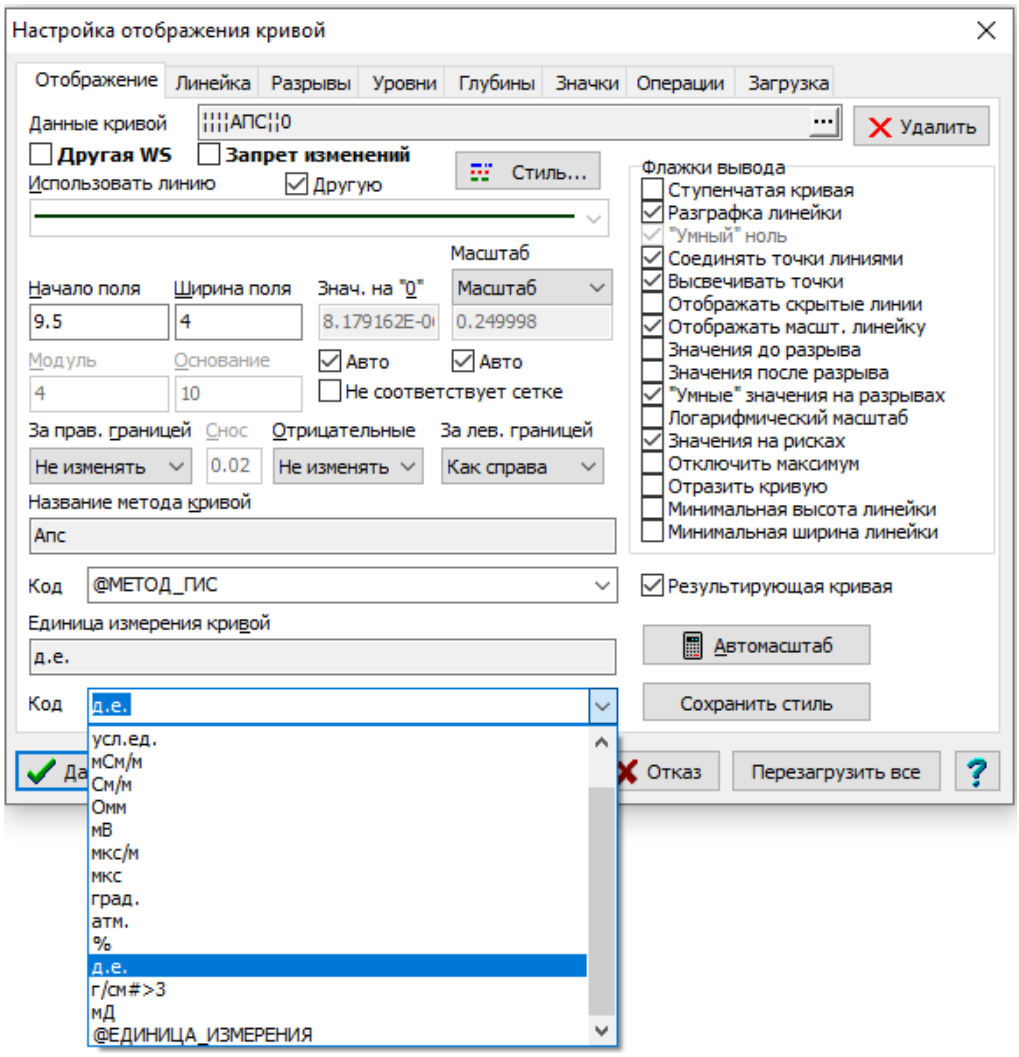


Рис.2.26. Настройка единиц измерения кривой Апс

При правильном расчете форма кривой Апс должна зеркально отображать форму исходной кривой SP (рис. 2.27).

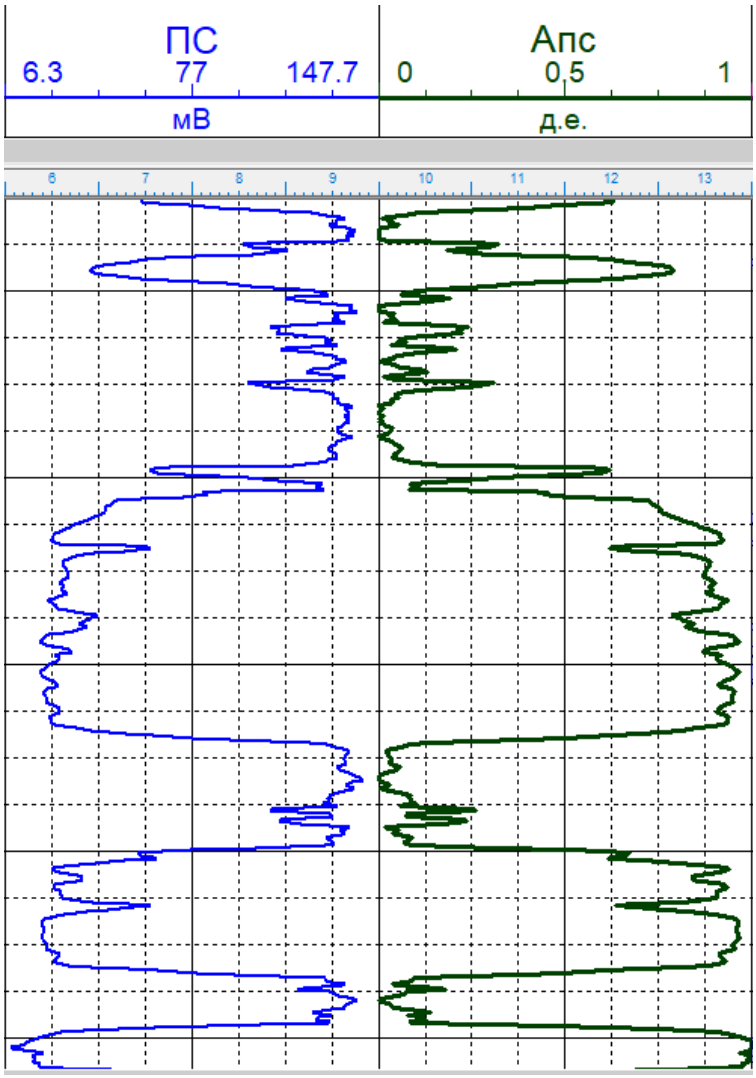


Рис. 2.27. Формы кривых ПС и Апс

Кривые «Линия глин» и «Линия песчаников» с планшета можно удалить.

2.10 РАСЧЕТ ДВОЙНЫХ РАЗНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПО МЕТОДАМ ГК И НК

Рассчитайте двойные разностные параметры по методу ГК – Агк ($\Delta I^{гк}$) и по методу НК – Анк ($\Delta I^{нк}$).

В меня главного окна «ПРАЙМА» выберите пункт «**Панель USER**» (рис. 2.28).

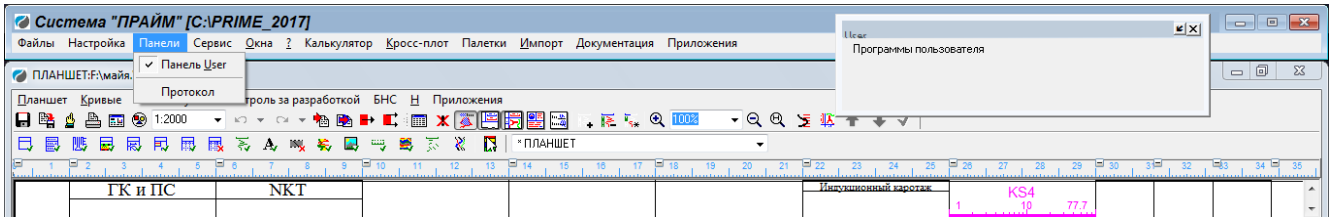


Рис. 2.28 «Панель USER»

Нажмите кнопку «Программы пользователя» открывается окно редактора программ (рис. 2.29).

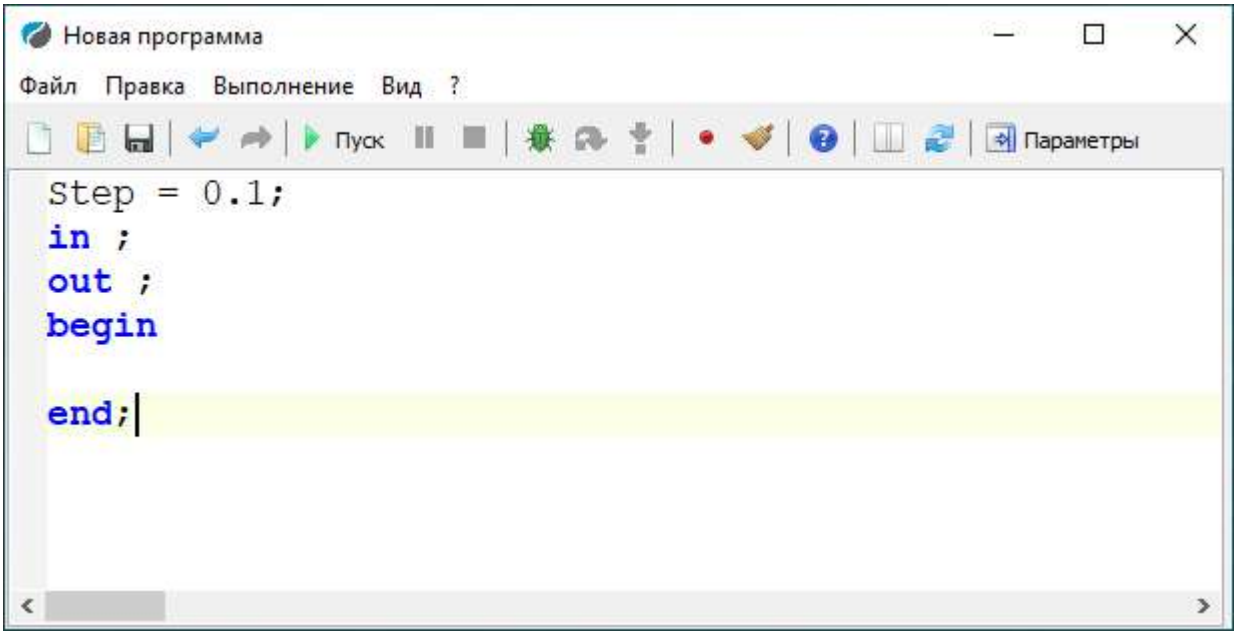


Рис. 2.29. Окно программ пользователя

В окне редактора введите программу для расчёта двойного разностного параметра Агк (рис. 2.30).

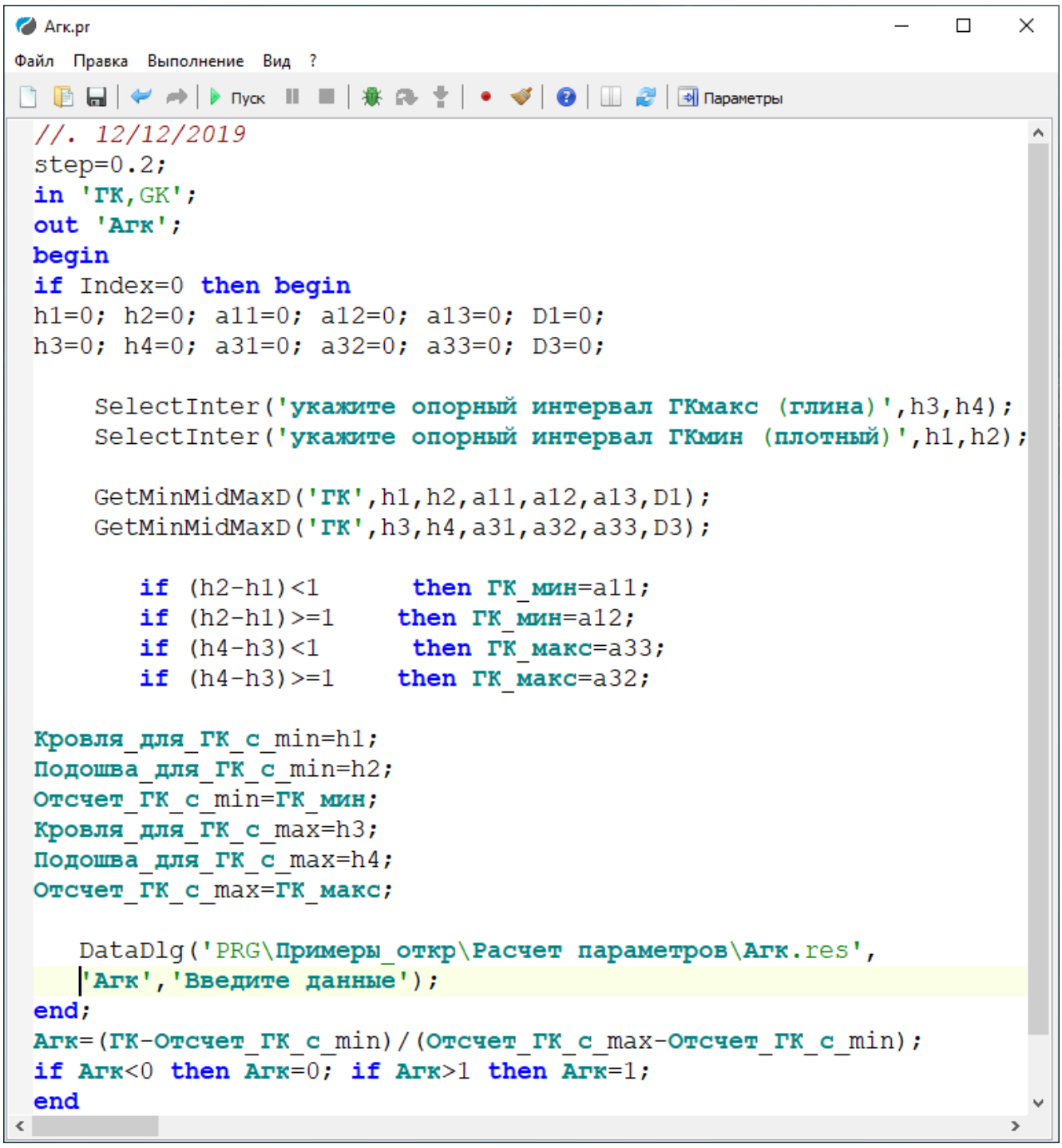


Рис. 2.30. Программа расчета параметра Агк

Запустите программу кнопкой «Пуск». Программа в режиме диалога запросит выделить два опорных пласта (рис. 2.31). Сначала кровлю и подошву опорного пласта с максимальным значение метода ГК (чистые глины), затем кровлю и подошву опорного пласта с

минимальными значениями метода ГК (чистые известняки или песчаники).

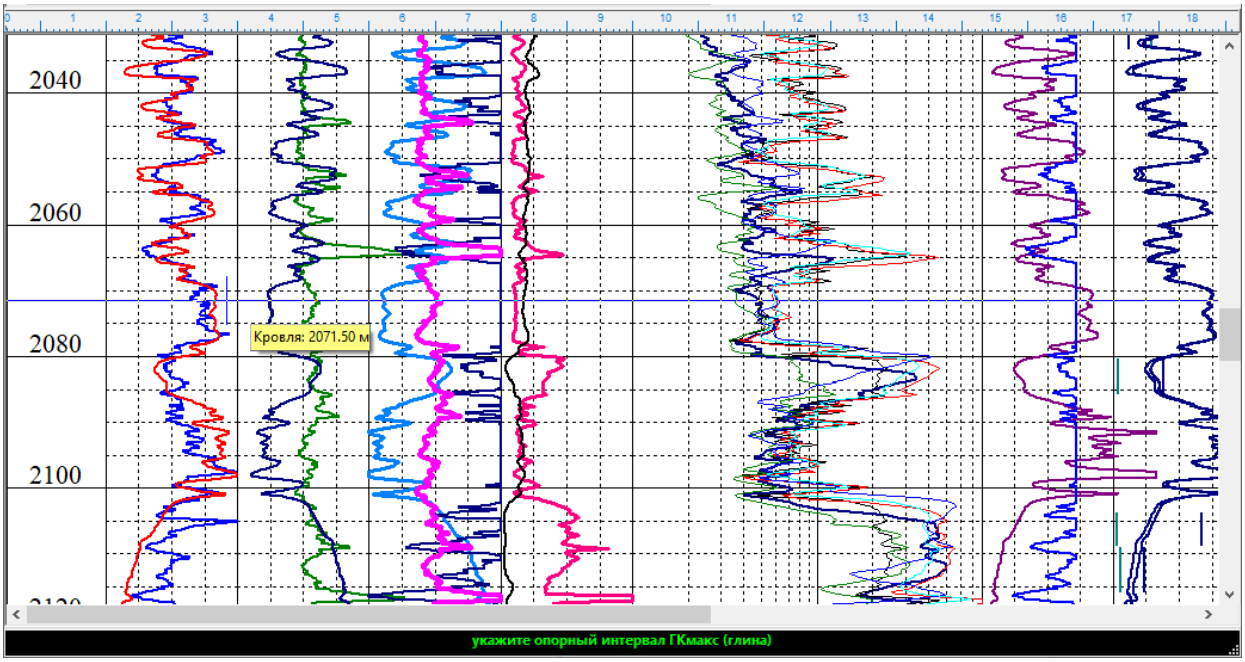


Рис. 2.31. Выделение опорных пластов

По завершению выделения выйдет окно с полученными параметрами опорных пластов (рис. 2.32).

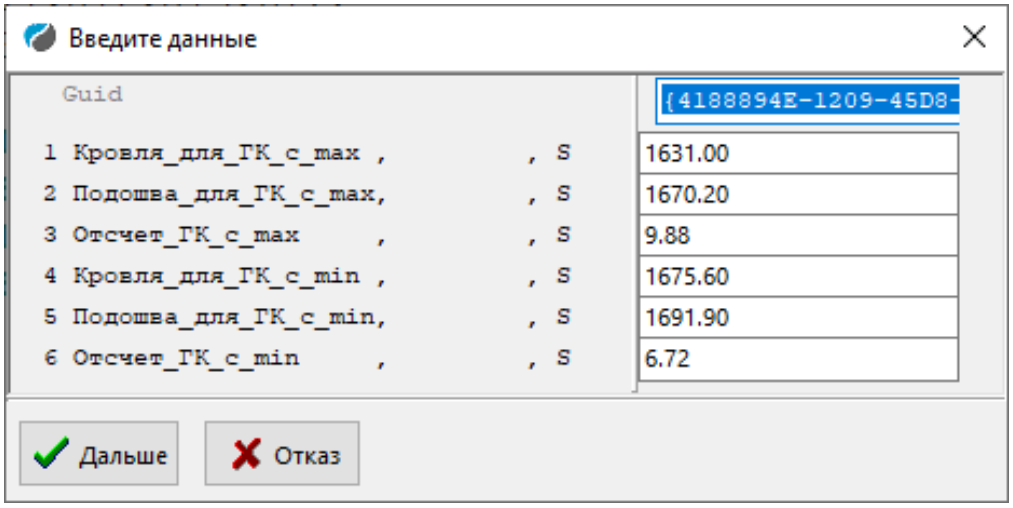


Рис 2.32. Полученные параметры опорных пластов

Нажмите кнопку далее и вставите рассчитанную кривую в планшет. Настройте вид кривой. Масштаб укажите от 0 до 1, единицы измерения – «д. е.».

Для расчёта двойного разностного параметра Анк в окне редактора введите следующую программу (рис. 2.33).

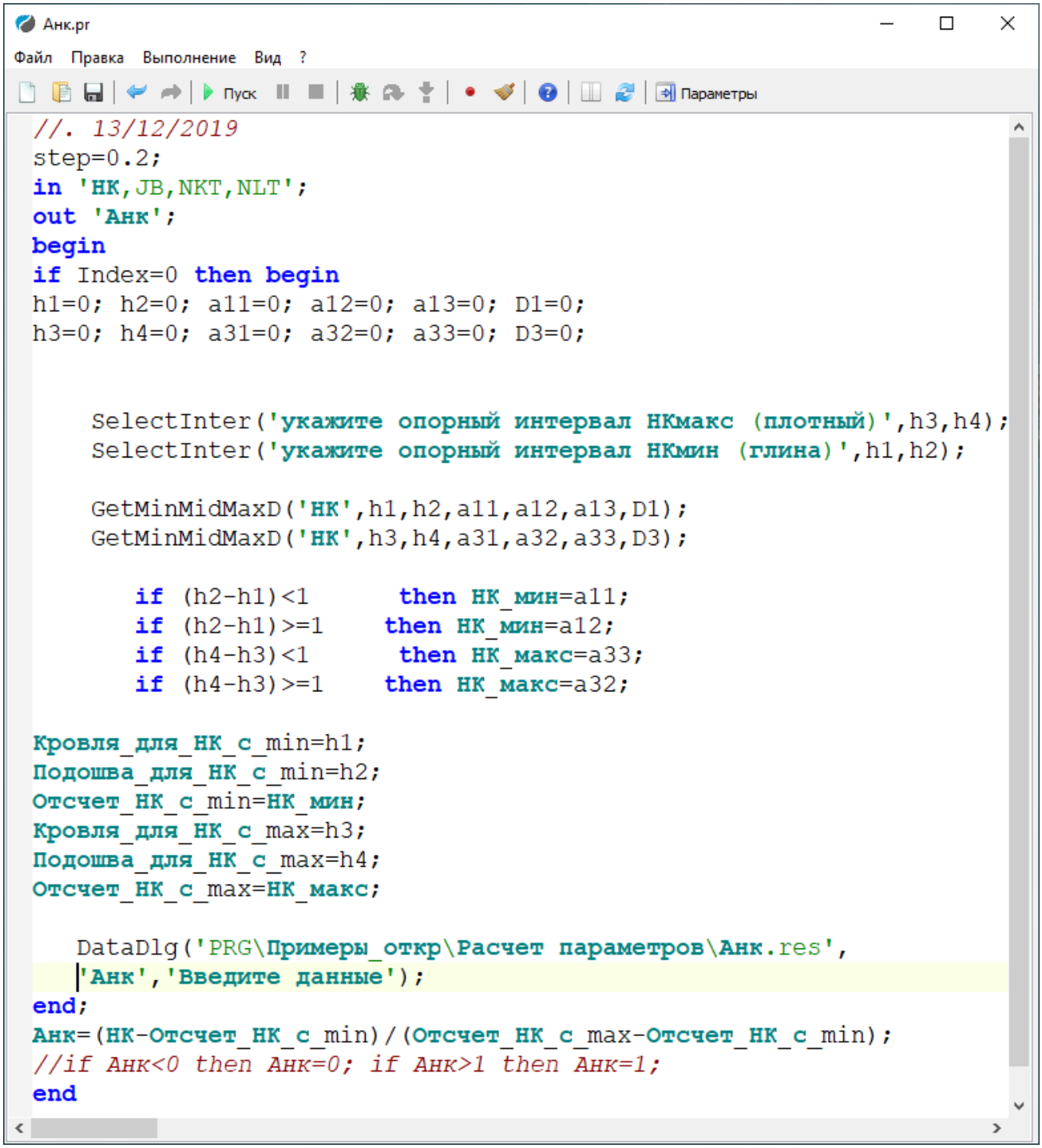


Рис.2.33. Программа расчета параметра Анк

Повторите все те же операции, что и для расчёта параметра Агк.

Рассчитанные кривые Агк и Анк должны повторять форму кривых ГК и НК но изменяться в пределах от 0 до 1.

2.11 РАСЧЕТ КОЛЛЕКТОРСКИХ СВОЙСТВ: Кг_пс, Кг_гк, Кп_пс И Кп_нк.

Рассчитайте коэффициенты глинистости по методам ГК (Кг_гк), ПС (Кг_пс) и коэффициенты пористости по методам ПС (Кп_пс) и НК (Кп_нк).

В меня главного окна «ПРАЙМА» выберите пункт «**Панель USER**» (рис. 2.34).

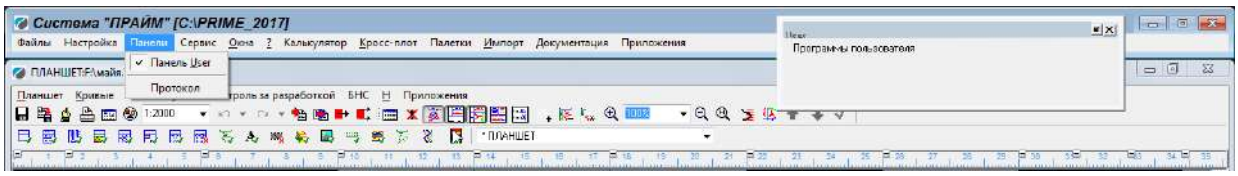


Рис. 2.34. «Панель USER»

Нажмите кнопку «Программы пользователя» открывается окно редактора.

Введите программу для расчёта коэффициентов пористости по методам ПС и НК и коэффициентов глинистости по методам ГК и ПС (рис. 2.35).

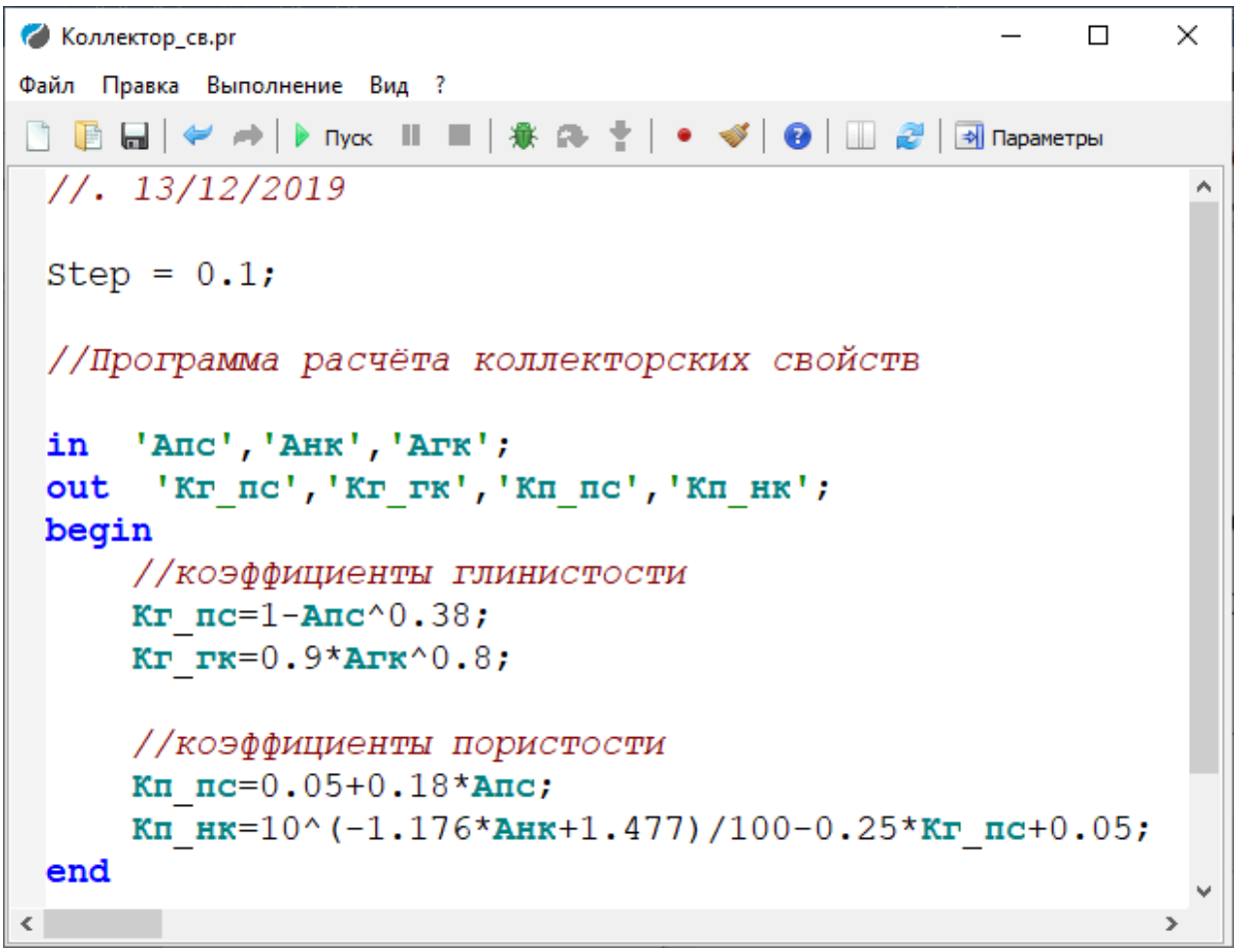


Рис. 2.35. Программа для расчета коллекторских свойств

Нажмите кнопку «Пуск». Вставите рассчитанные кривые в Планшет.

Настройте внешний вид и масштаб кривых. Для коэффициентов пористости (Кп_пс и Кп_нк) установите масштаб от 0 до 0.3. Для коэффициентов глинистости (Кг_сп Кг_гк) – от 0до 0.7. Единицы измерения – «д.е.».

2.12 ПОСТРОЕНИЕ ЛИТОЛОГЧЕСКОЙ КОЛОНКИ

Откройте окно «Программа пользователя» через окно «Панель USER». В окне редактора введите формулу для расчета литологии (рис. 2.36).

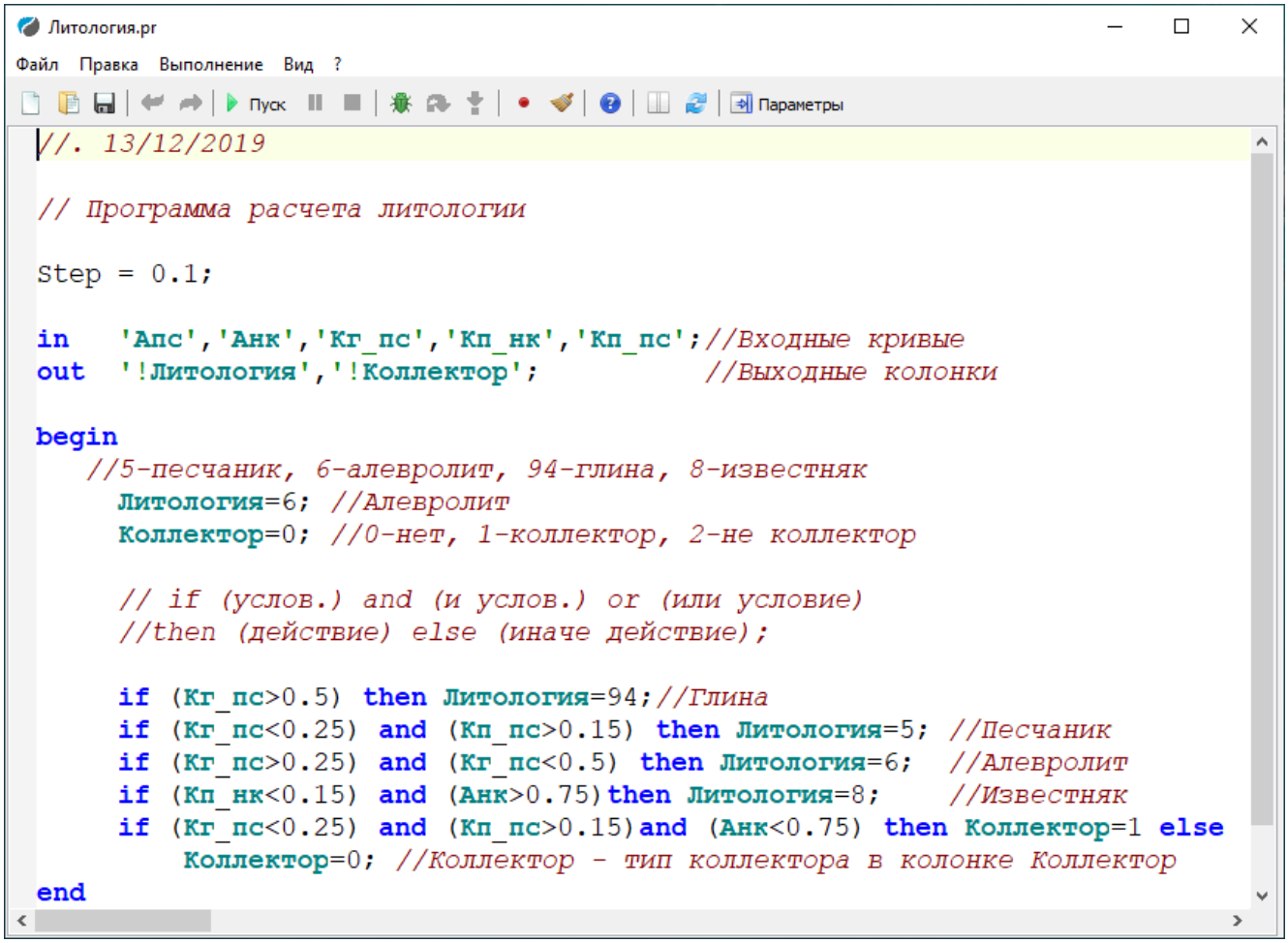


Рис. 2.36. Формула для расчёта литологиической колонки

После нажатия кнопки «Пуск» колонки «Литология» и «Коллектор» в планшете заполнятся автоматически (рис. 2.37).

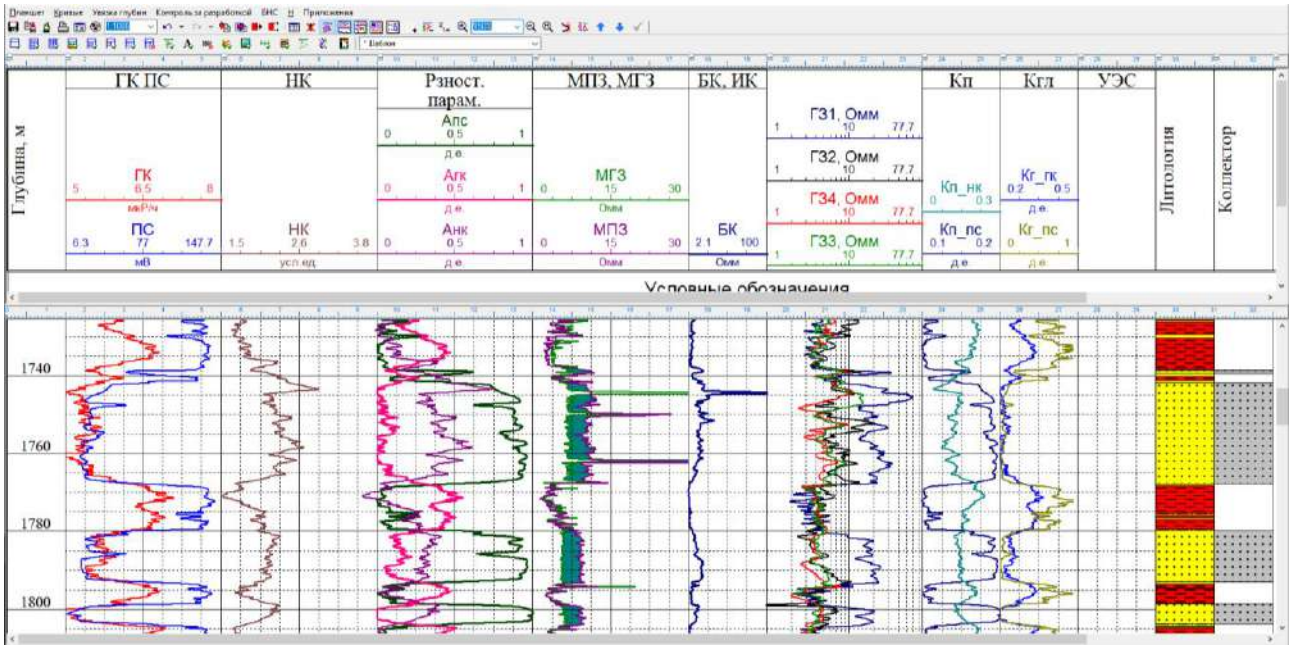


Рис. 2.37. Планшет с колонкаи «Литология» и Коллектор»

2.13 ОБРАБОТКА ДАННЫХ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ (БКЗ, ИК, БК).

В меню планшета откройте «БНС» / «Обработка электрометрии (ЭЛЕКОМП)» / «Комплексная интерпретация данных БКЗ, БК, ИК (СНГФ)» (рис. 2.38).

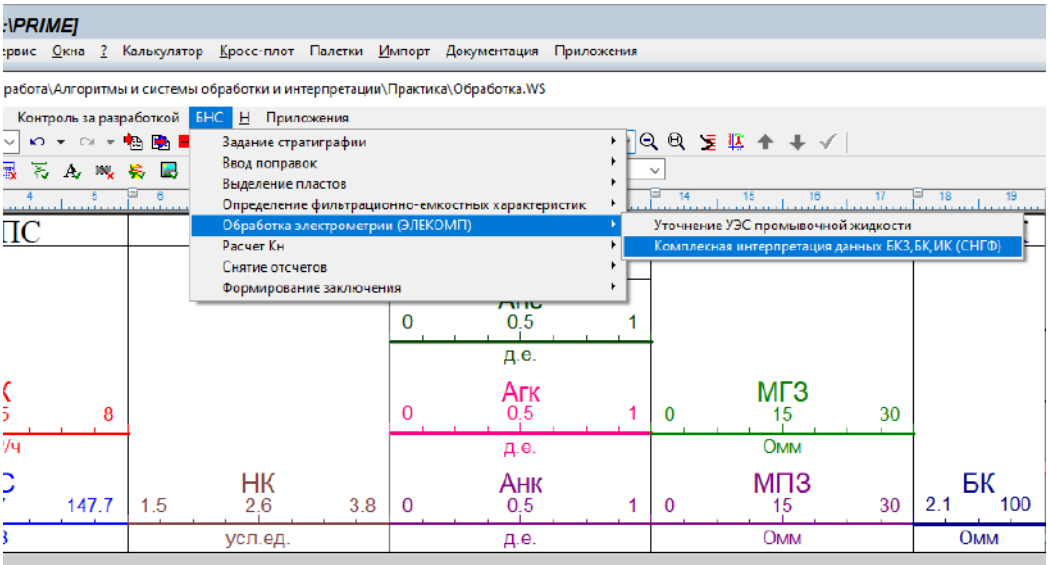


Рис. 2.38. Пункт меню «Обработка электрометрии»

В открывшемся окне заполните значения «Номинальный диаметр скважины» и «сопротивление бурового раствора» (рис. 2.39).

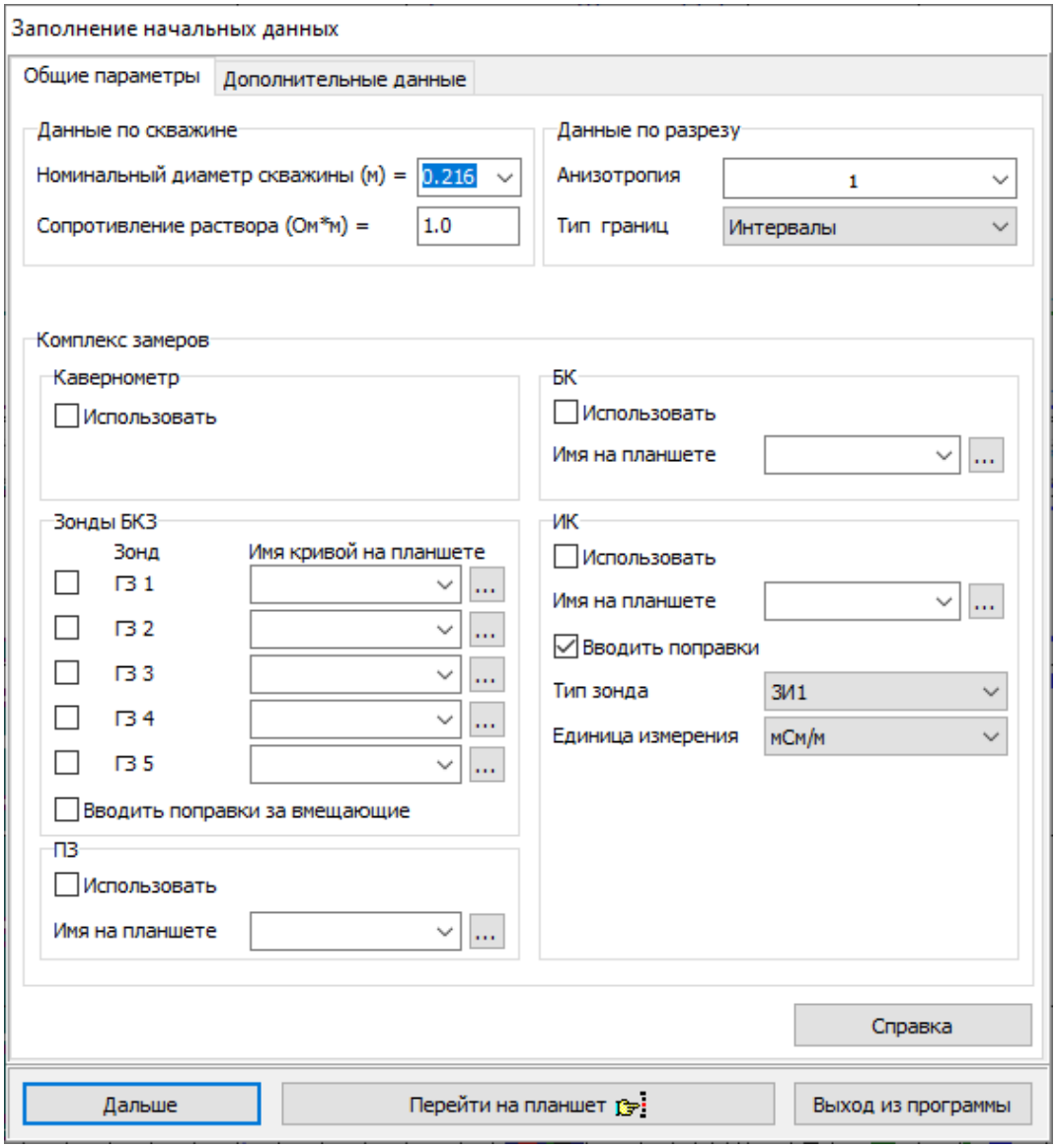


Рис. 2.39. Окно заполнение начальных данных электрометрии

Укажите тип границ – «Интервалы». Укажите на планшете (нажав кнопку ...) названия зондов бокового каротажного зондирования (БКЗ) (рис. 2.40).

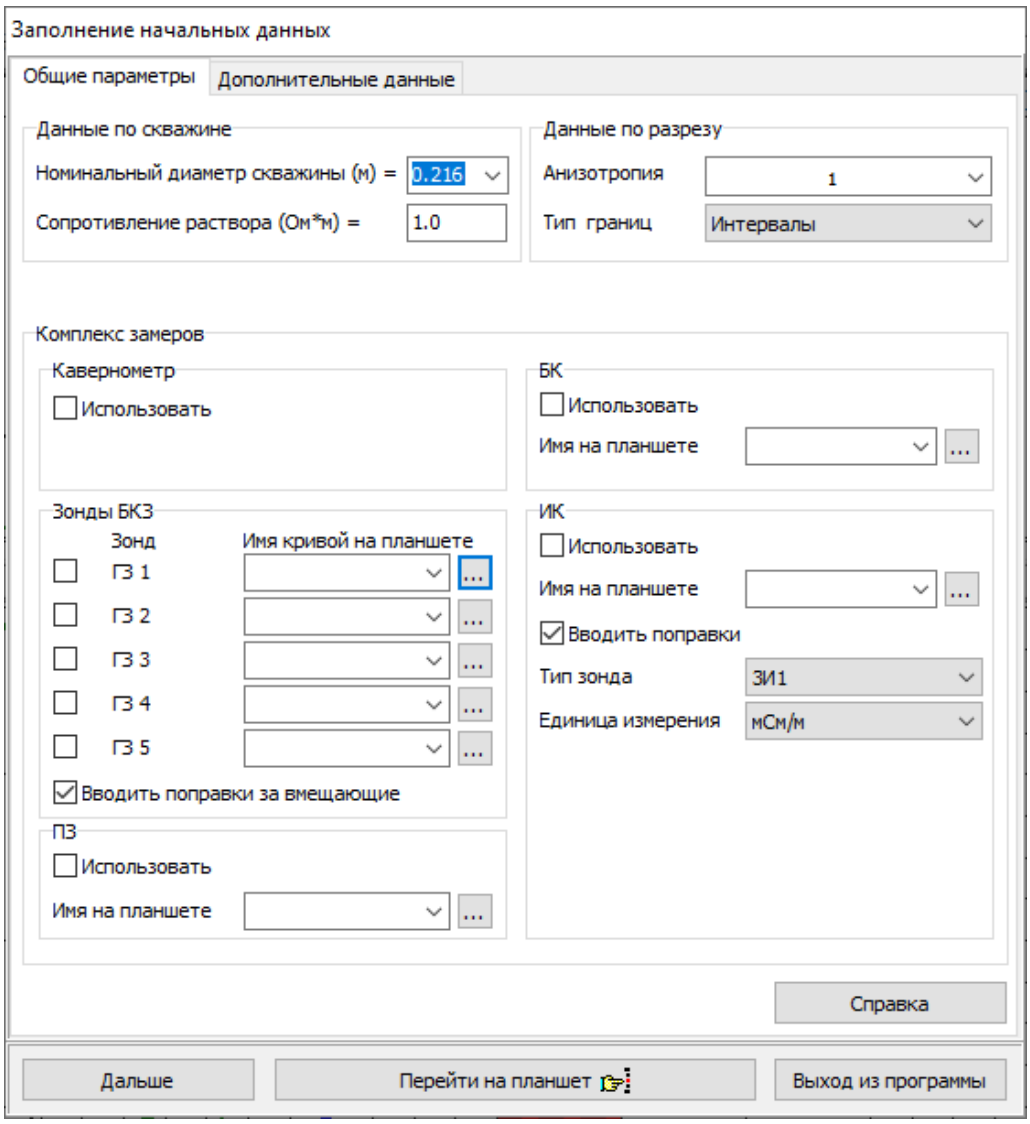


Рис. 2.40. Заполнение названий кривых БКЗ

Отмеченные кривые отобразятся в списке зондав БКЗ. Галочкой отметьте ввод поправки за вмещающие породы (рис. 2.41).

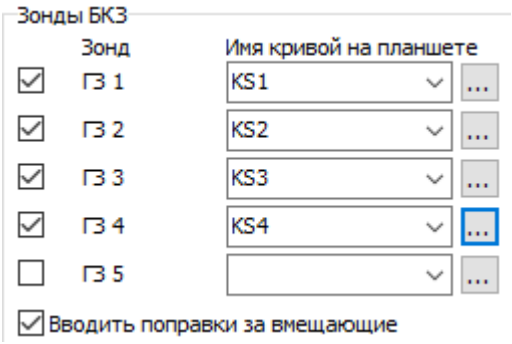


Рис. 2.41. Названия кривых БКЗ

Если имеются данные бокового каротажа (БК - LLD) и индукционного каротажа (ИК - IL), укажите их названия и единицы измерения.

Нажмите кнопку «Дальше» и укажите интервалы обработки электрометрии, щелкая мышкой по кровле и подошве пласта.

Выхода из режима выделения интервалов производится кнопкой «ESC». Открывается окно «Снятых отсчетов», где можно выбрать интервалы и значения методов, которые будут принимать участие в расчёте (рис. 2.42).

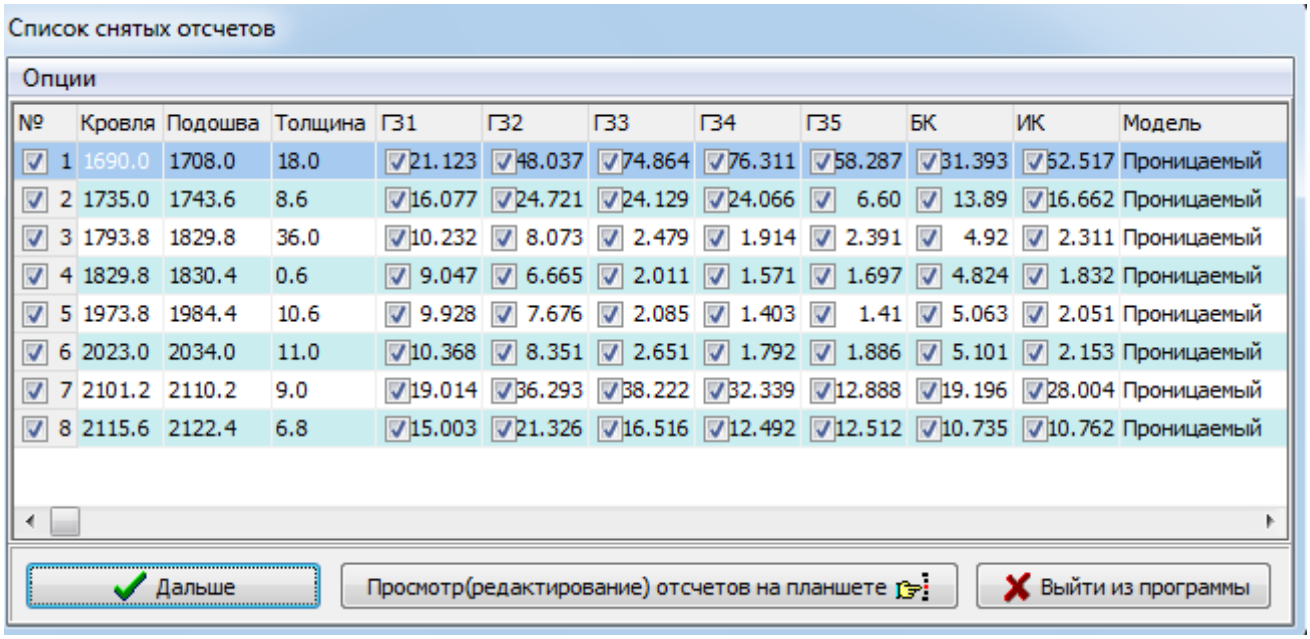
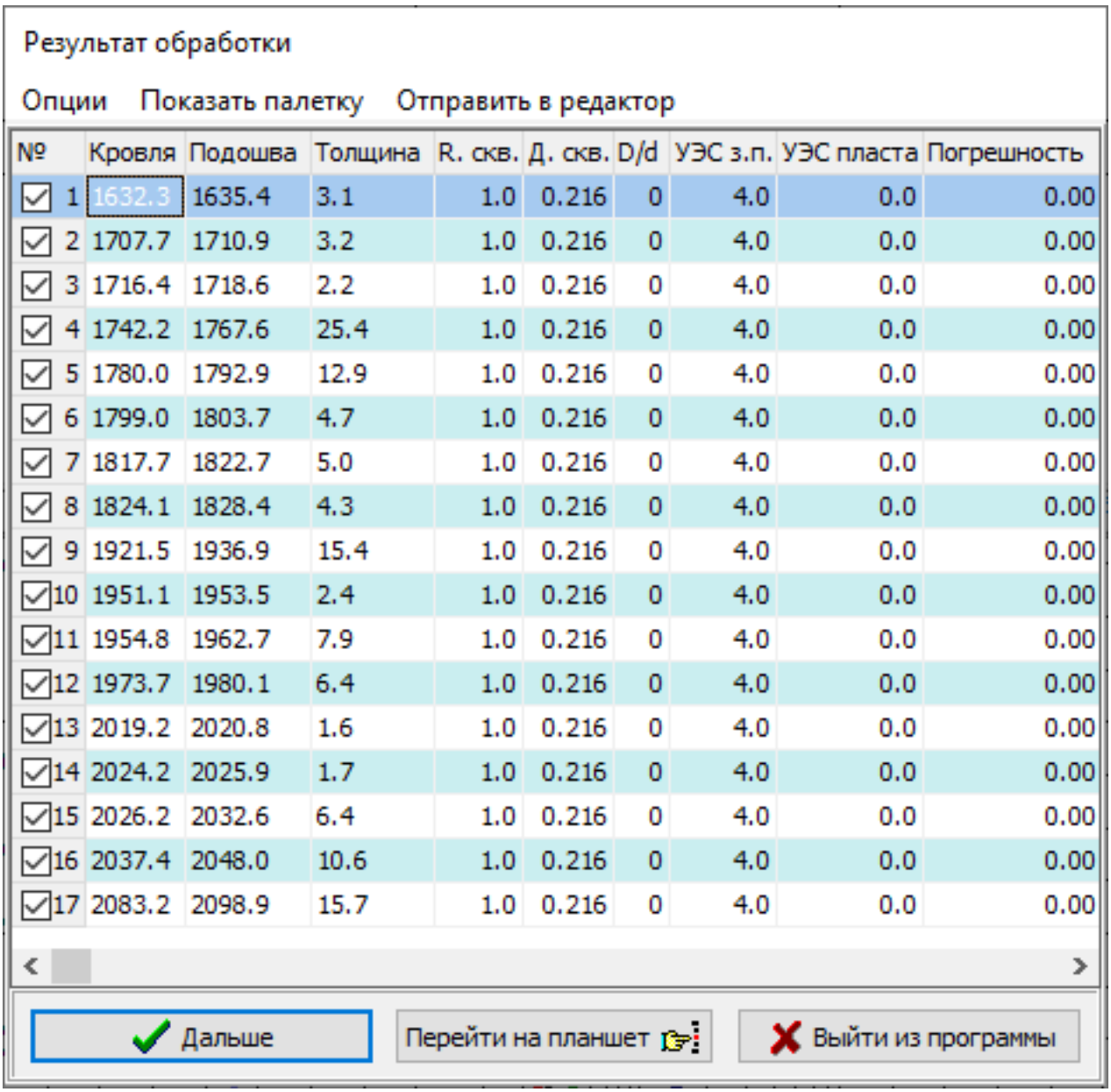


Рис. 2.42. Список снятых отсчетов

После редактирования снятых отсчетов нажмите кнопку «Дальше». Программа проведет расчет электрических параметров и выведет на экран окно «Результата обработки электрометрии» (рис. 2.43).



№	Кровля	Подошва	Толщина	R. скв.	Д. скв.	D/d	УЭС з.п.	УЭС пласта	Погрешность
1	1632.3	1635.4	3.1	1.0	0.216	0	4.0	0.0	0.00
2	1707.7	1710.9	3.2	1.0	0.216	0	4.0	0.0	0.00
3	1716.4	1718.6	2.2	1.0	0.216	0	4.0	0.0	0.00
4	1742.2	1767.6	25.4	1.0	0.216	0	4.0	0.0	0.00
5	1780.0	1792.9	12.9	1.0	0.216	0	4.0	0.0	0.00
6	1799.0	1803.7	4.7	1.0	0.216	0	4.0	0.0	0.00
7	1817.7	1822.7	5.0	1.0	0.216	0	4.0	0.0	0.00
8	1824.1	1828.4	4.3	1.0	0.216	0	4.0	0.0	0.00
9	1921.5	1936.9	15.4	1.0	0.216	0	4.0	0.0	0.00
10	1951.1	1953.5	2.4	1.0	0.216	0	4.0	0.0	0.00
11	1954.8	1962.7	7.9	1.0	0.216	0	4.0	0.0	0.00
12	1973.7	1980.1	6.4	1.0	0.216	0	4.0	0.0	0.00
13	2019.2	2020.8	1.6	1.0	0.216	0	4.0	0.0	0.00
14	2024.2	2025.9	1.7	1.0	0.216	0	4.0	0.0	0.00
15	2026.2	2032.6	6.4	1.0	0.216	0	4.0	0.0	0.00
16	2037.4	2048.0	10.6	1.0	0.216	0	4.0	0.0	0.00
17	2083.2	2098.9	15.7	1.0	0.216	0	4.0	0.0	0.00

Рис. 2.43. Результат обработки электрометрии

Скорректировать результат обработки можно с помощью палетки нажав кнопку «Показать палетку» (рис. 2.44).

После завершения обработки электрометрии рассчитаются кривые Rtbkz_p (сопротивление пласта), погр_УЭС_п (погрешность определения удельного сопротивления), УЭС_зп (удельное электрическое сопротивление зоны проникновения) и D/d

(отношение диаметра зоны проникновения к номинальному диаметру скважины).

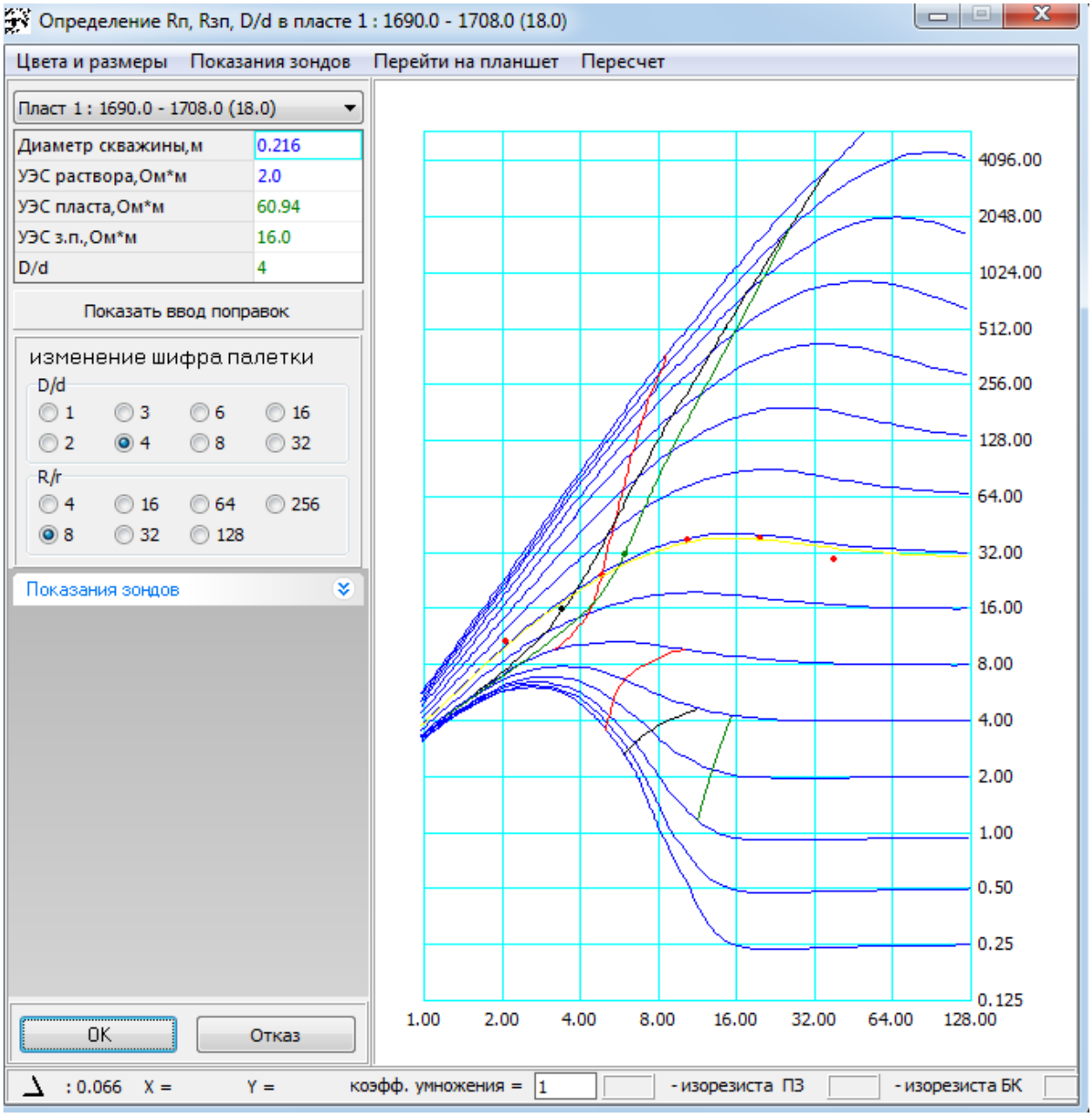


Рис. 2.44. Палетка для определения УЭС

Полученные кривые вставите в планшете в поле УЭС. Результатом расчёта будут попластовые кривые. Настройте вид, масштаб и единицы измерения кривых.

2.14 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРА НАСЫЩЕНИЕ.

Откройте окно «Программа пользователя» через окно «Панель USER». В окне редактора введите формулу для определения характера насыщения (рис. 2.45).

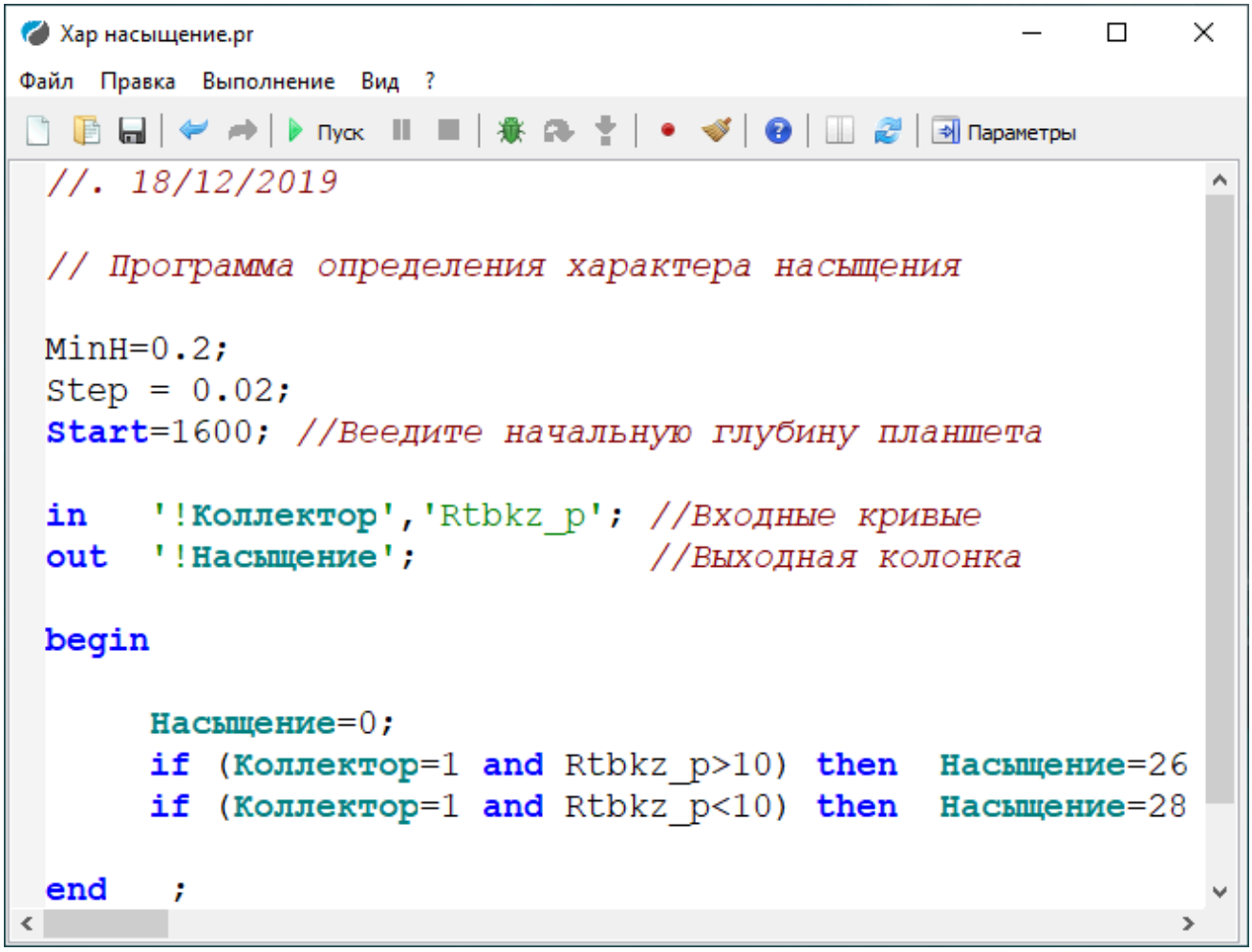


Рис. 2.435 Программа определения характера насыщения коллекторов

После нажатия на кнопку «Пуск» колонка «Насыщение» в планшете заполнятся автоматически (рис. 2.46).

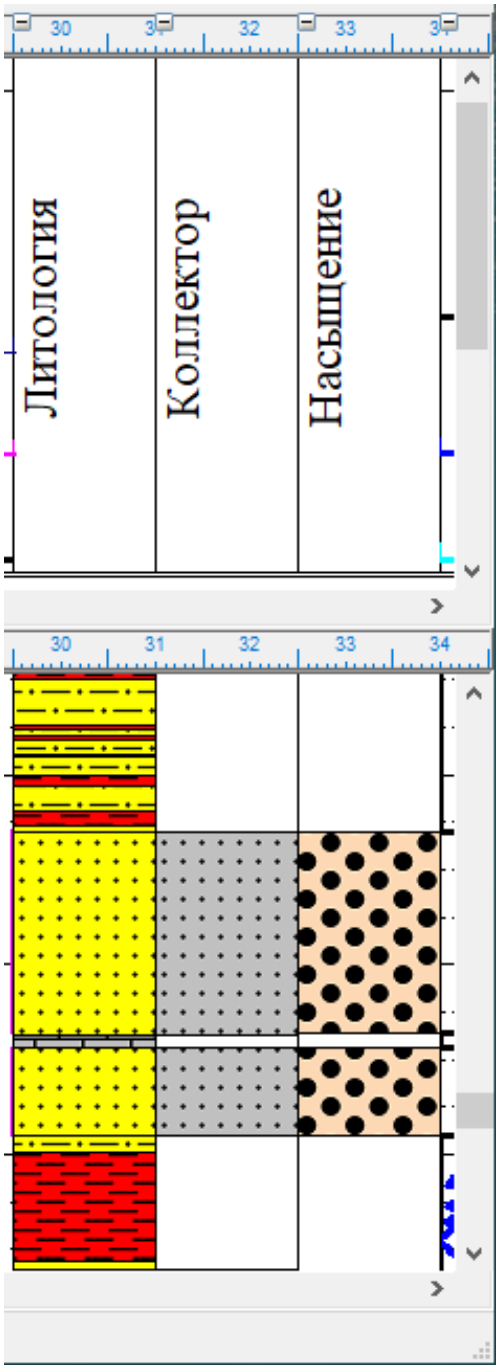


Рис. 2.46. Колонки планшета

2.15 СОЗДАНИЕ ОБЪЕМНОЙ МОДЕЛИ.

Откройте окно «Программа пользователя» через окно «Панель USER». В окне редактора введите формулу для расчета объемной модели (рис. 2.47).

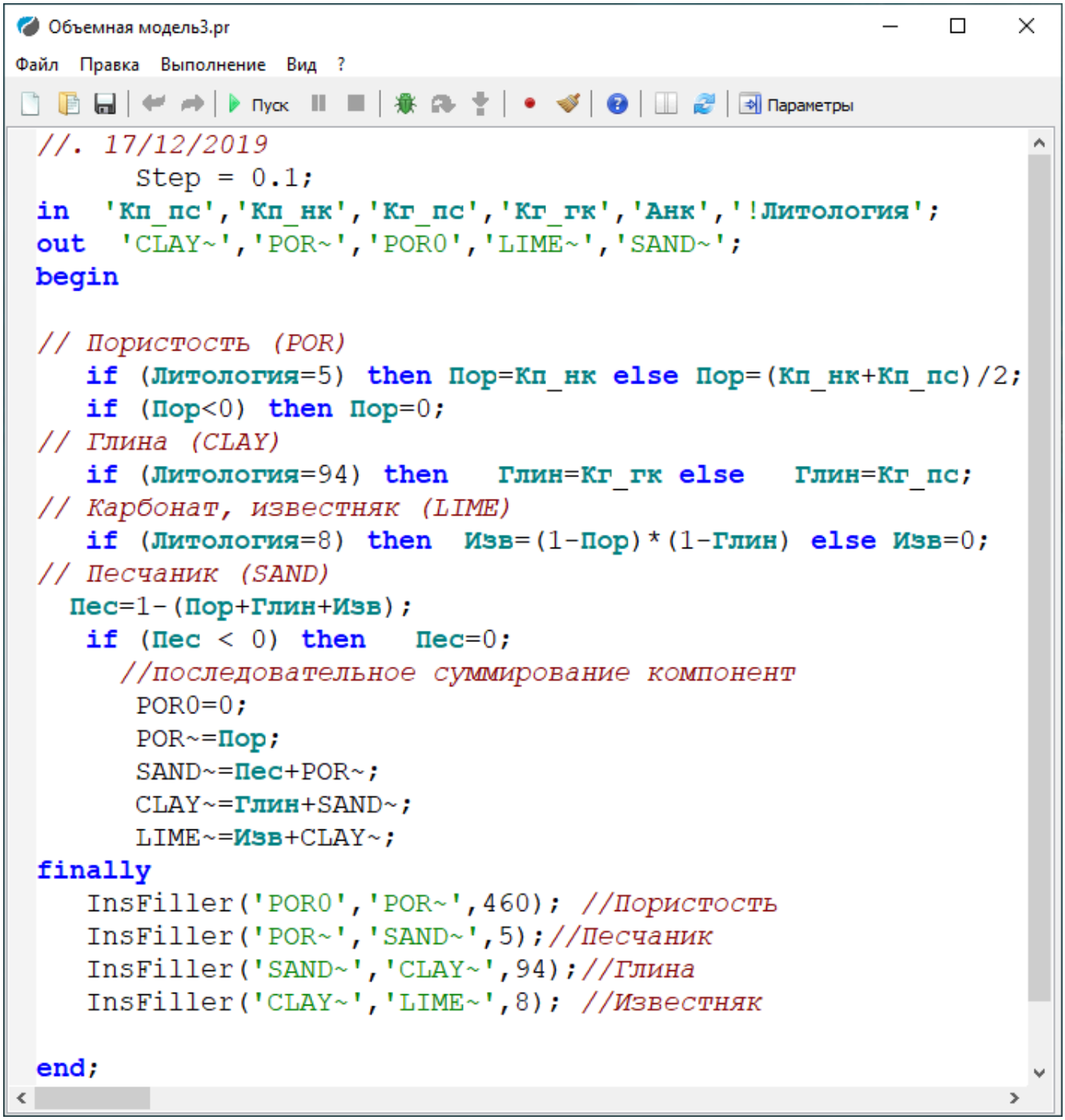


Рис. 2.47. Формула для расчета объемной модели

Вставите рассчитанные кривые в подготовленное поле. Установите масштаб для всех кривых от 0 до 1. Заливка между кривыми вставится автоматически (рис. 2.48).

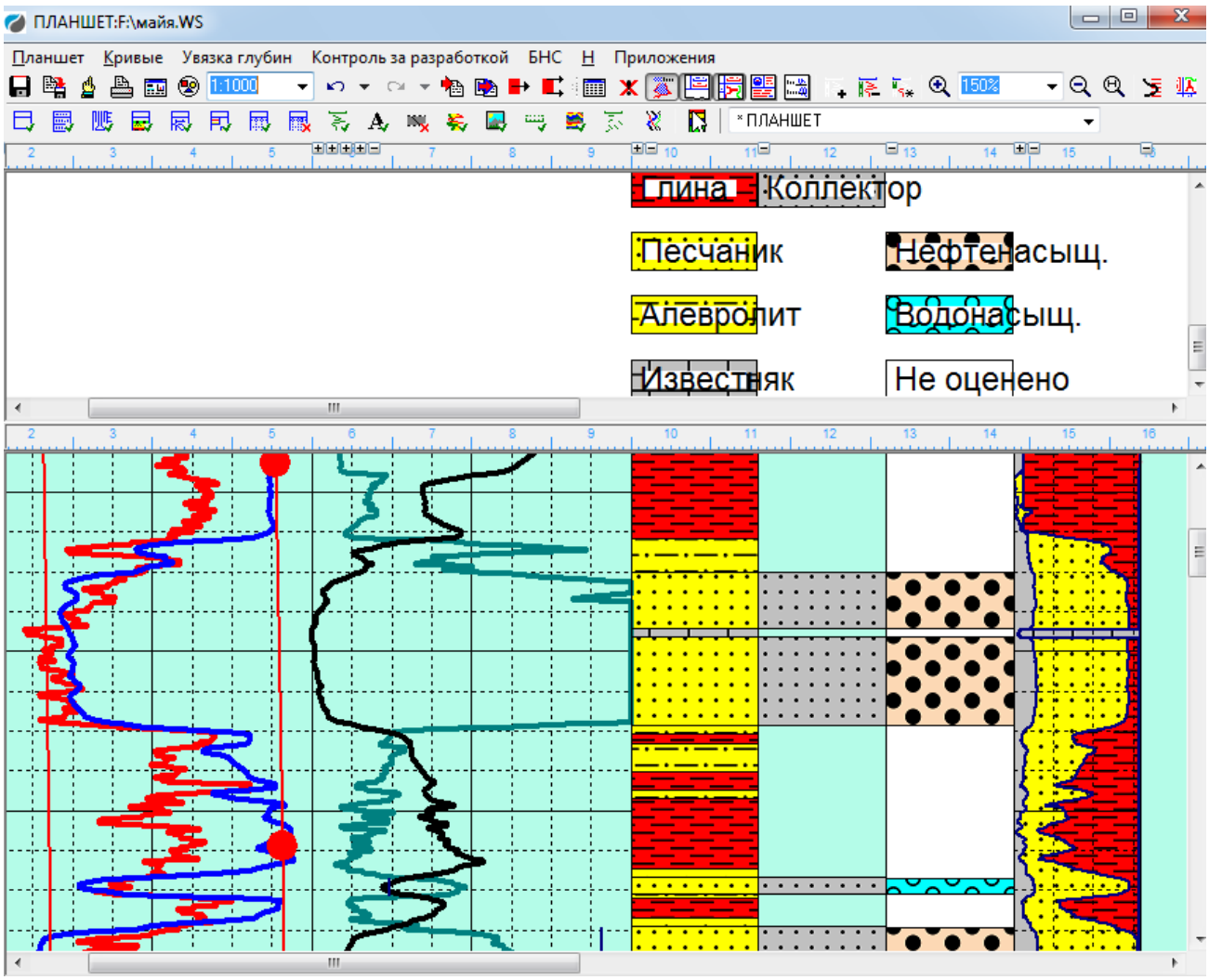


Рис. 2.48. Планшет с объёмной моделью

2.16 РАСЧЕТ ФЛЮИДНОЙ МОДЕЛИ

Откройте окно «Программа пользователя» через окно «Панель USER».

В окне редактора введите формулу для расчета коэффициентов насыщения (коэффициента остаточного водонасыщения Кво, коэффициента водонасыщения Кв и коэффициента нефтенасыщения Кн) и построения флюиидной модели (модели компонентного состава пластовой жидкости) (рис. 2.49).

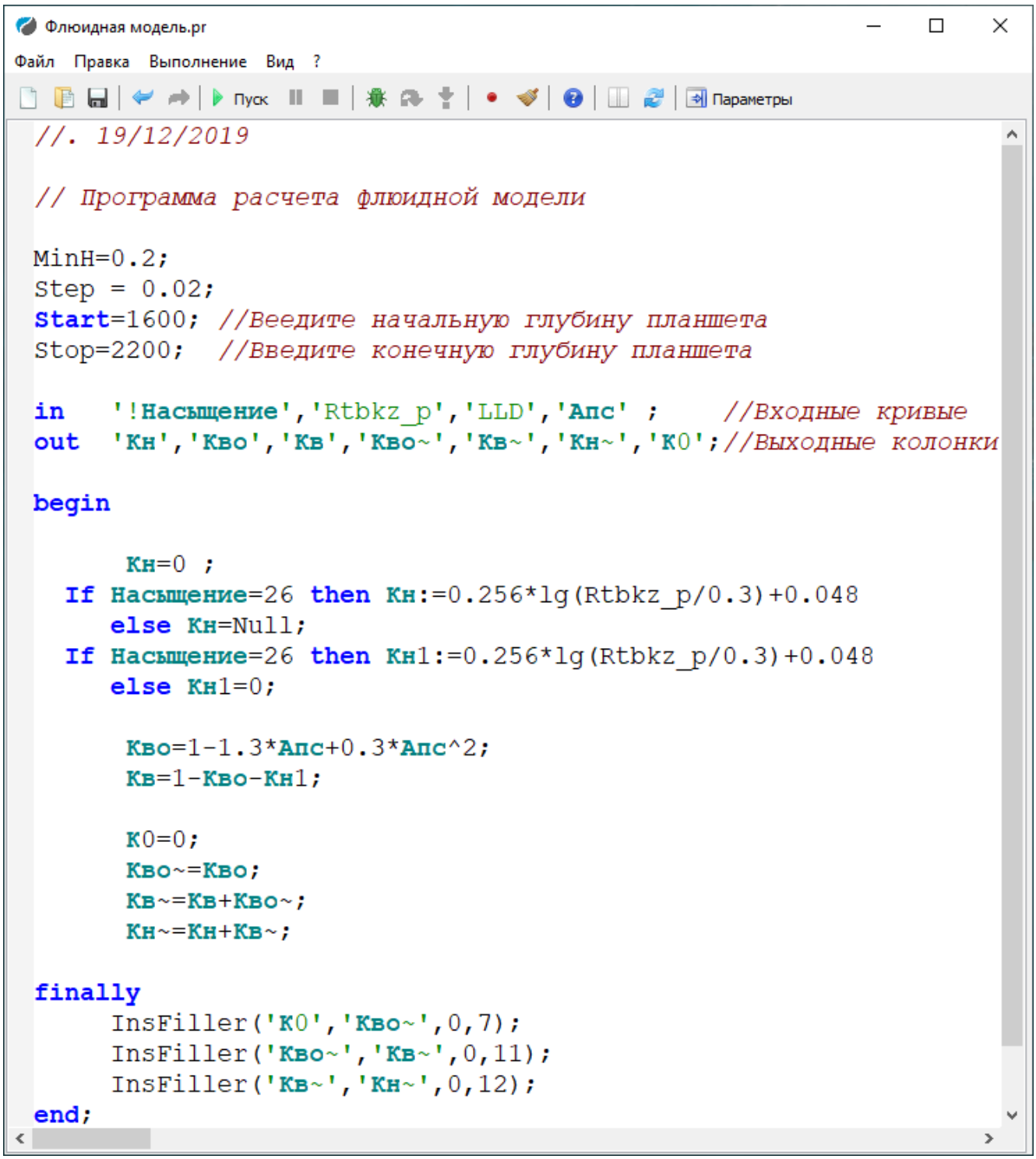


Рис. 2.49. Программа расчета флюидной модели

Запустите программу и вставите рассчитанные кривые в планшет. Установите масштаб для всех кривых от 0 до 1. Настройте толщину и цвет кривых. Откройте окно свойств кривой Кн. На

вкладке отображение установите галочку «Значение до разрыва» (рис. 2.50).

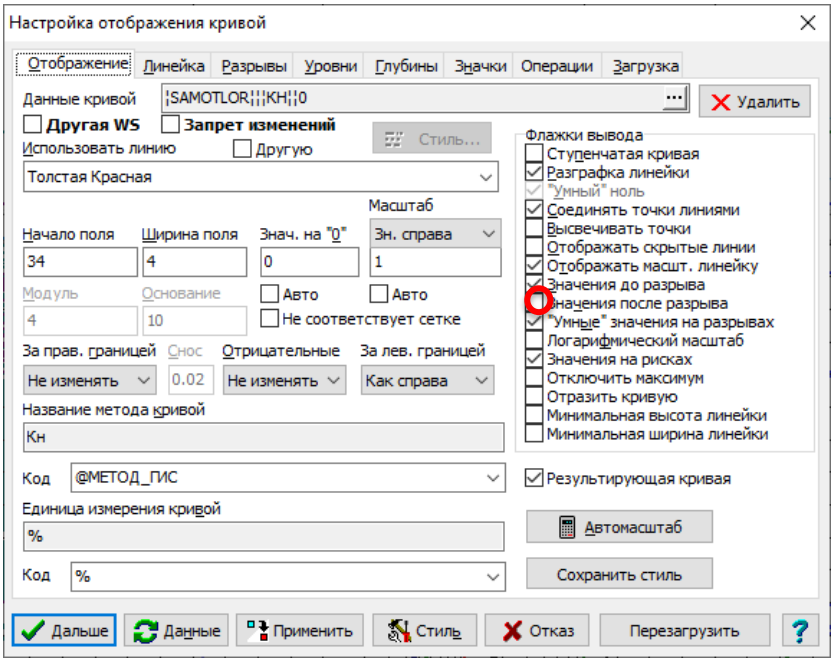


Рис. 2.50. Свойства кривой Кн

На вкладке «Разрывы» установите размер шрифта – 0.7, точность отображения (число знаков после запятой) – 3 и горизонтальное выравнивание до разрыва – «К центру» (рис. 2.51.).

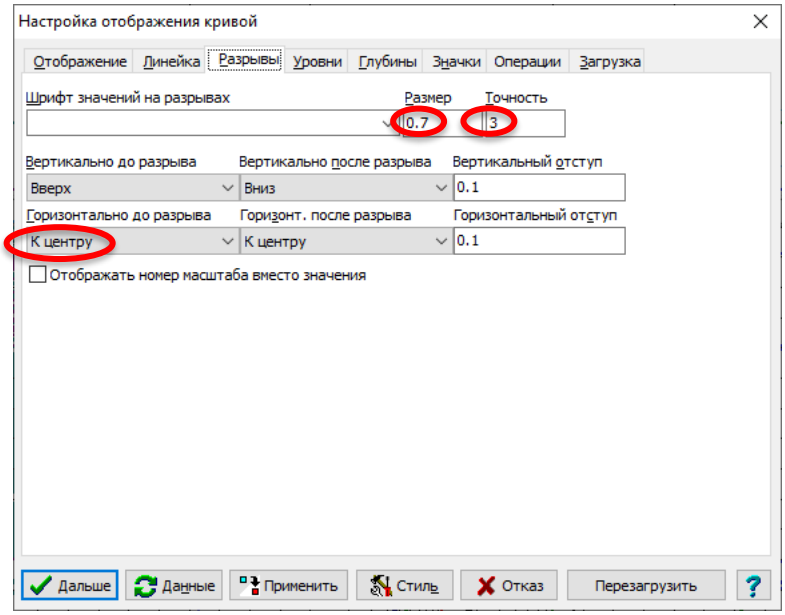


Рис.2.51. Настройка цифровых значений на разрыве

Чтобы значения заливок флюидной модели отображались в легенде их необходимо настроить. Вызовите окно свойств первой заливки, щелкнув правой кнопкой мыши по ней. На вкладке «Отображение» установите значения положения начала и конца Значков заливки в легенде (рис. 2.52.)

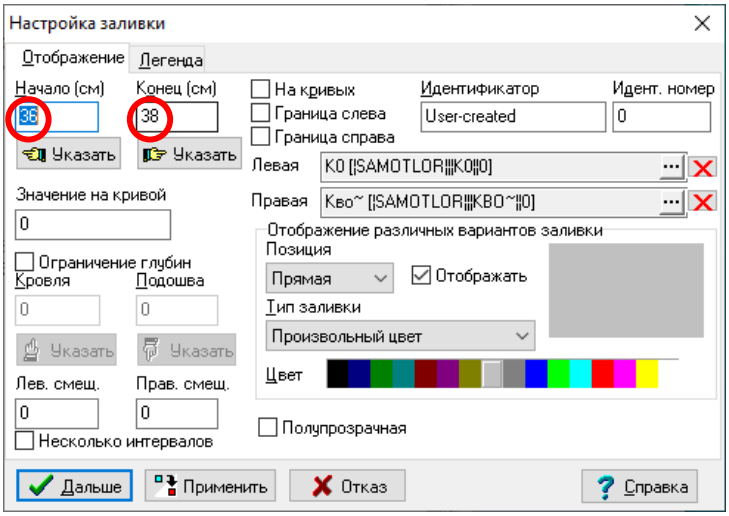


Рис 2.52. Настройка положения легенды

На вкладке «Легенда» укажите название заливки и размер шрифта (рис. 2.53.).

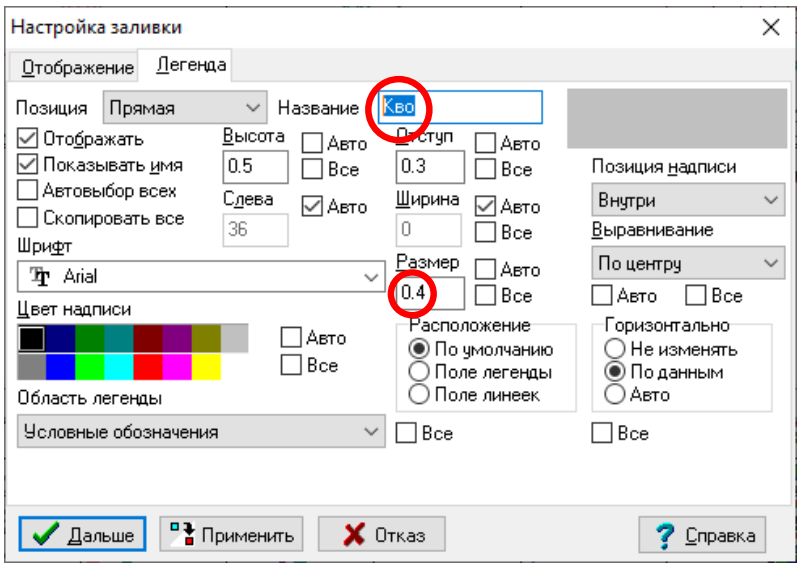


Рис 2.53. Настройка названия заливки

Повторите все операции для остальных заливок. Легенда отобразится в шапке планшета (рис. 2.54.).

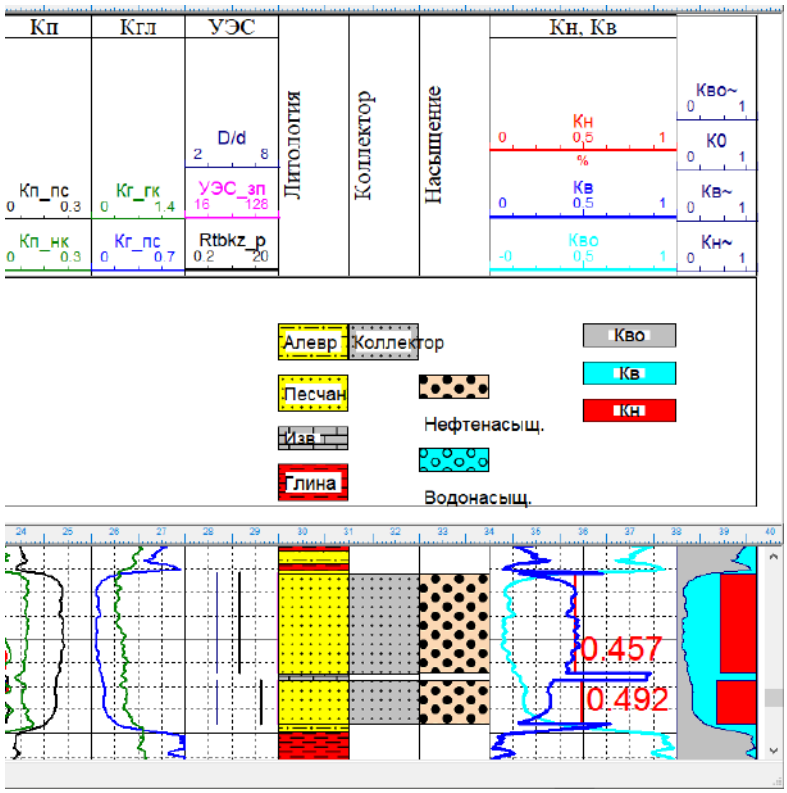


Рис 2.54. Результат настройки коэффициентов насыщения и флюидной модели

2.17 ВЫВОД РЕЗУЛЬТАТОВ ОБРАБОТКИ

Обработанный планшет можно вывести на печать или сохранить графическим файлом.

Чтобы вывести файлом выберите в меню пункт «**Планшет**» / «**Печать**». Нажмите кнопку «Устройства» и из выпадающего списка «Тип устройства» выберите пункт «**Вывод в TIFF**».

После нажатия кнопки «Печать» будет сформирован растровый файл с расширением *.TIFF по указанному пути (рис. 2.55).

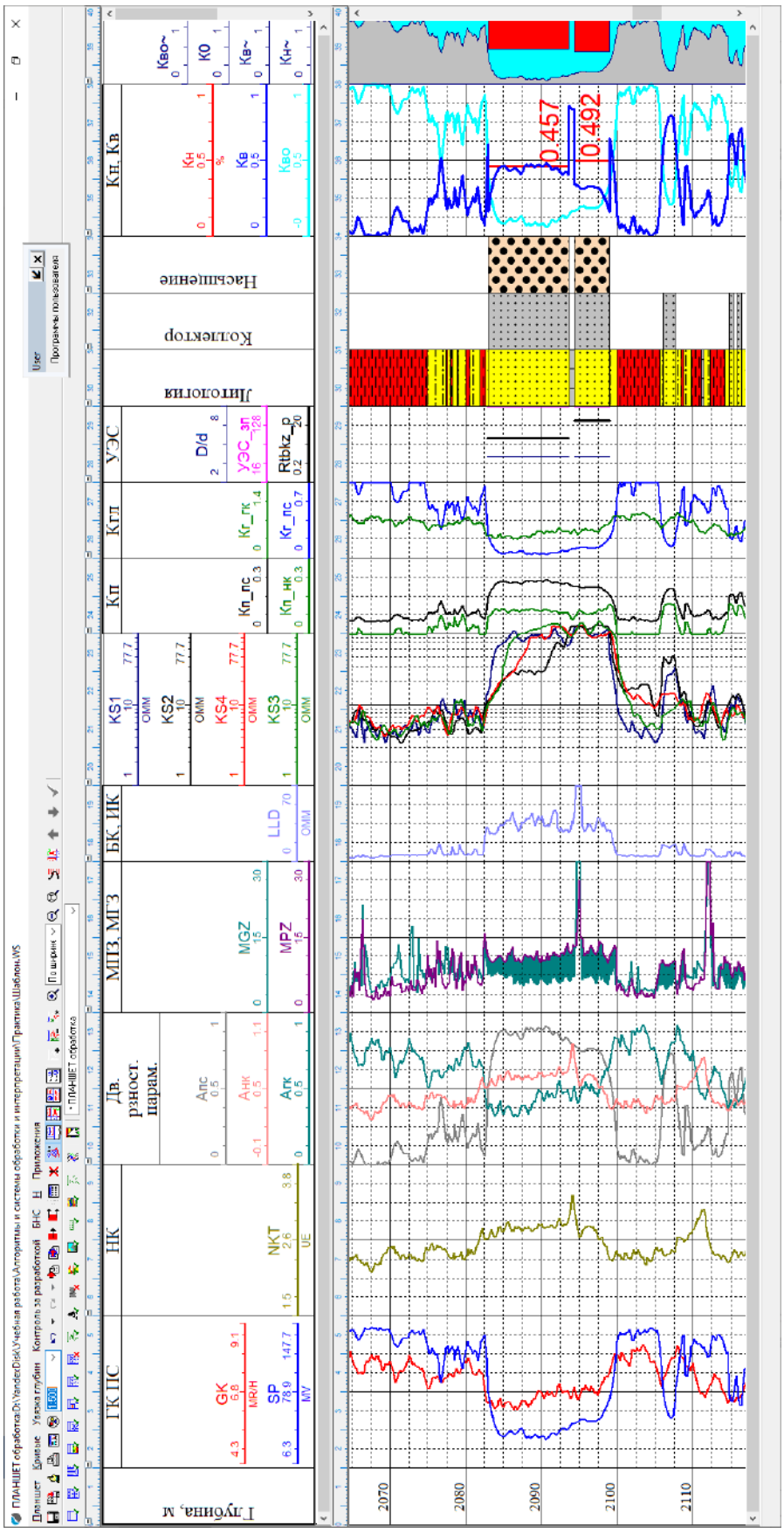


Рис. 2.55. Фрагмент готового планшета

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стандарт хранения данных каротажа LAS (версии 1.2 и 2.0) Учебное пособие / Д.К.Нургалиев, В.Е. Косарев, Л.Р. Косарева, Б.М. Насыртдинов– Казань: Казанский университет, 2012 – 23 с.

2. LAS 2.0. A FLOPPY DISK STANDARD FOR LOG DATA. //Canadian Well Logging Society Floppy Disk Committee. 1992 – http://www.cwls.org

3. ООО НПЦ "ГеоТЭК". Руководство пользователя. Прайм. Интегрированная система сбора, обработки, хранения ГИС.: Уфа, 2016.

4. Савинков А. В. Практическое руководство по обработке и интерпретации материалов геофизических исследований скважин: методические указания / А. В. Савинков. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2009. –57 с.

5. Латышева, М.Г. Практическое руководство по интерпретации диаграмм геофизических исследований скважин. /М.Г. Латышева М.: Недра, 1991. 219 с.

6. Сковородников, И. Г. Практическое руководство по обработке и интерпретации результатов геофизических исследований скважин. /И.Г. Сковородников, Екатеринбург: издание УГГУ, 2006. 80 с.

7. Итенберг, С.С. Интерпретация результатов геофизических исследований скважин. / С.С Итенберг. М.: Недра, 1987. 375 с.

8. Косков, В.Н Теоретические основы дисциплины «Геофизические исследования скважин» и методика выполнения квалификационных работ: учеб.-метод. пособие / В.Н. Косков. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2016. – 121 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 5
1. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ «ПРАЙМ» 7
1.1 ГОРЯЧИЕ КЛАВИШИ 7
1.2 ПЛАНШЕТ 14
1.3.1. Общие свойства объектов планшета 16
1.3.2. Просмотр списка объектов 16
1.3.3. Просмотр информации об объекте 17
1.3.4. Активизация объекта 18
1.3.5. Просмотр свойств объекта 18
1.3.6. Просмотр данных объекта 18
1.3.7. Удаление объекта из планшета: 18
1.3.8. Раздел шапки 19
1.3.9. Раздел линеек 19
1.3.10. Раздел кривых 21
1.3.11. Вставка нового объекта 21
1.3.12. Пустые колонки 21
1.3.13. Колонки глубин 22
1.3.14. Сетки 22
Линейные сетки 22
Логарифмические сетки 22
1.3.15. Кривые 23
1.3.16. Попластовые колонки 23
1.3.17. Колонка литологий 23
1.3.18. Надписи 24
1.3.19. Заливки 24
1.3.20. Двумерные кривые 24
1.3.21. Примитивы точки 25
1.3.22. Примитивы интервала 25
1.3.23. Конструкция скважины 25
1.3.24. Раздел легенды 26
2. ОПЕРАТИВНА ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ ГИС В ПРОГРАММЕ «ПРАЙМ» 27
2.1 Спецификация формата LAS 27
2.2 ПЕТРОФИЗИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МЕТОДИКИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ 31
2.3 СОЗДАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ И РАБОЧЕГО ПЛАНШЕТА 32
2.4 НАСТРОЙКА ПЛАНШЕТА 35
2.5 ИМПОРТ КРИВЫХ 41

2.6 ВСТАВКА КРИВЫХ В ПЛАНШЕТ 44
2.7 НАСТРОЙКА КРИВЫХ 46
2.8 ВСТАВКА ЗАЛИВОК 49
2.9 РАСЧЕТ ДВОЙНОГО РАЗНОСТНОГО ПАРАМЕТРА ПО МЕТОДУ ПС 51
2.10 РАСЧЕТ ДВОЙНЫХ РАЗНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПО МЕТОДАМ ГК И НК 55
2.11 РАСЧЕТ КОЛЛЕКТОРСКИХ СВОЙСТВ: Кг_пс, Кг_гк, Кп_пс И Кп_нк. 60
2.12 ПОСТРОЕНИЕ ЛИТОЛОГЧЕСКОЙ КОЛОНКИ 62
2.13 ОБРАБОТКА ДАННЫХ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ (БКЗ, ИК, БК). 63
2.14 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРА НАСЫЩЕНИЕ. 69
2.15 СОЗДАНИЕ ОБЪЕМНОЙ МОДЕЛИ. 70
2.16 РАСЧЕТ ФЛЮИДНОЙ МОДЕЛИ 72
2.17 ВЫВОД РЕЗУЛЬТАТОВ ОБРАБОТКИ 76
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 78

Учебное издание

Николай Сергеевич Земцов, канд. геол.-минерал. наук

Обработка данных ГИС в системе «Прайм»

Лабораторный практикум
к практическим занятиям и самостоятельной работе
по дисциплине «Алгоритмы и системы обработки данных ГИС»
для студентов специальности
21.05.03 – «Технология геологической разведки»
всех форм обучения

Редактор Н. Л. Сайгина
Компьютерная верстка Н. С. Земцов

Подписано в печать __.__.2020 г.
Бумага писчая. Формат 60 х 84 1/16.
Гарнитура Times New Roman. Печать на ризографе.
Печ. л. 4.6. Уч.-изд. л. 3.2. Тираж 50 экз. Заказ___

Издательство УГГУ
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30.
Уральский государственный горный университет.
Отпечатано с оригинал-макета
в лаборатории множительной техники УГГУ.



Министерство науки и высшего образования РФ

ФГБОУ ВО
«Уральский государственный горный университет»

ОДОБРЕНО
Методической комиссией
факультета геологии и геофизики УГГУ
«20» марта 2020 г.
Председатель комиссии

_____ проф. В.И. Бондарев

Н. С. Земцов, Белышев Ю.В., Болотнова Л.А

«Алгоритмы и системы обработки и интерпретации ГИС»

Методические указания к практическим занятиям и самостоятельной работе по дисциплине "Алгоритмы и системы обработки и интерпретации ГИС " для студентов специальности 21.05.03 Технология геологической разведки специализации «Геофизические методы исследования скважин» *всех форм обучения*

Екатеринбург
2020

Цели и задачи лабораторной работы.

Целью данного курса лабораторных работ является получение навыков обработки данных геофизических исследований скважин с помощью специализированных компьютерных программ обработки:

Формат данных результатов геофизических исследований скважин;

Литологическое расчленение разреза скважины

Определение двойных разностных параметров

Определение петрофизических коэффициентов (глинистость, пористость);

Определение характера флюида пластов коллекторов;

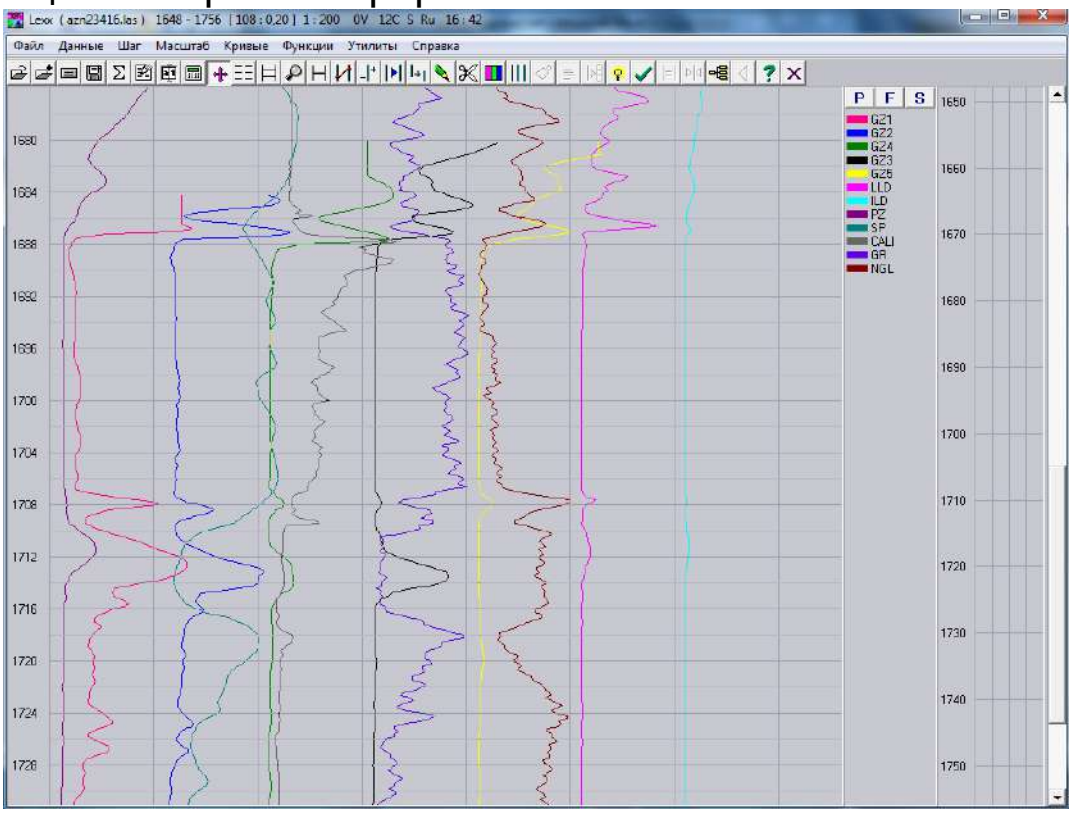
Определение фильтрационных свойств пластов коллеторов;

Корреляция результатов исследования скважин, определение запасов месторождения.

Предварительная обработка

Программа LEXX

Программа LEXX представляет собой многофункциональный редактор каротажных кривых и предназначена для редактирования и различных функциональных преобразований геофизических кривых, хранящихся в файлах формата LAS и ASCII.

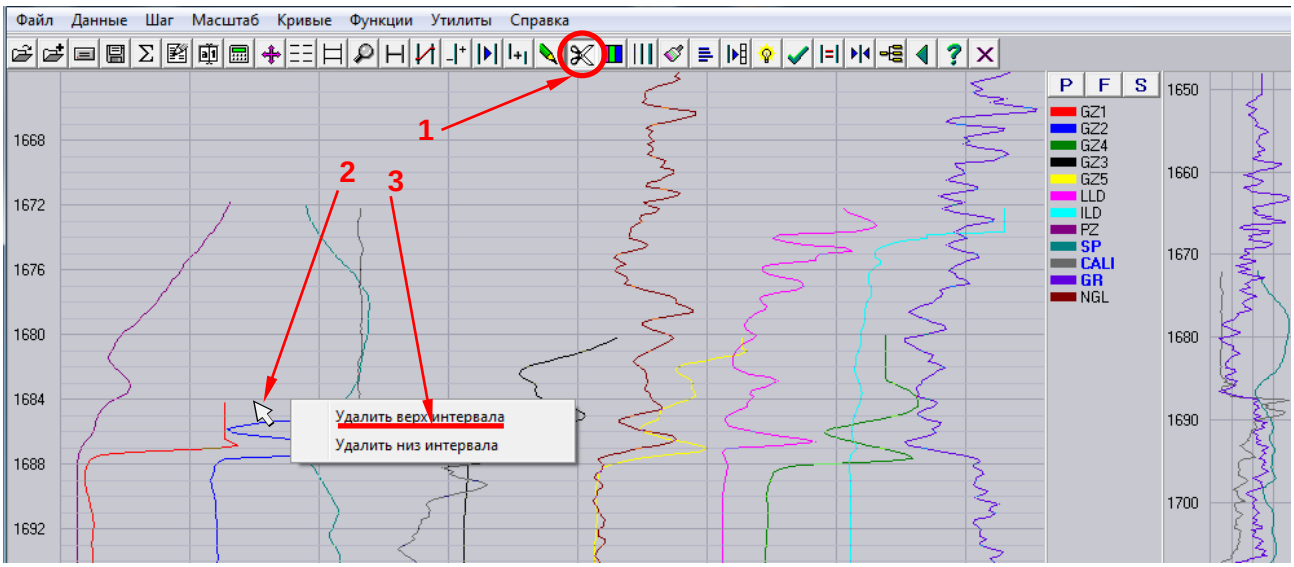


Программа создана для геофизиков-интерпретаторов и позволяет в несколько раз ускорить процесс редактирования каротажных кривых.

Максимальное число загружаемых кривых - 50.

Устанавливаем один интервал для всех методов:

1. Нажимаем кнопку «Удаление фрагмента» -  ;
2. Устанавливаем курсор на метке глубины, выше или ниже которой нужно удалить значения и нажимаем левую кнопку мыши;
3. В контекстном меню выбираем нужный пункт.



Функциональные клавиши

Действия функциональных клавиш программы.

F1 - Вызов справки по программе

F2 - Загрузить данные

F3 - Добавить данные

F4 - Сохранить данные

F5 - Показать карту данных

F6 - Уравнять графические аттрибуты выделенных кривых

F7 - Центрировать выделенную кривую

F8 - Переключение цветов кривых (Исходные/Именные)

F9 - Настройки программы

F10 - Переход в меню программы

F12 - Переключение языка интерфейса (Русский/Английский)

Home - Переход к началу интервала

End - Переход в конец интервала

PageUp - Скроллинг на половину страницы вверх

PageDn - Скроллинг на половину страницы вниз

Up - Скроллинг вверх

Down - Скроллинг вниз

Space - Скроллинг вниз или вверх, в зависимости от положения курсора мыши

Left - Смещение выделенной кривой влево

Right - Смещение выделенной кривой вправо

Tab - Переключение между текущим и предыдущим режимами

Delete - Удалить все границы или интервалы, в зависимости от режима

BackSpace - Отмена выполненной операции

Esc - Включить экранную заставку

Визуализация данных

Просмотр кривых на экране

Для перемещения по глубине вверх и вниз используйте вертикальную полосу прокрутки в правом углу экрана. Кроме того, для перемещения по интервалу можно использовать следующие клавиши:

Home - Переход к началу интервала

End - Переход к концу интервала

PgUp - Скроллинг вверх на половину страницы

PgDn - Скроллинг вниз на половину страницы

Up - Скроллинг вверх

Down - Скроллинг вниз

Space - Скроллинг вниз, если курсор мыши находится в нижней половине экрана.

Space - Скроллинг вверх, если курсор мыши находится в верхней половине экрана.

Вспомогательный трек

Вспомогательный трек расположен справа от легенды кривых, снабжен шкалой глубин всего загруженного интервала и может содержать любые из загруженных кривых. Для помещения кривых на вспомогательный трек нужно выделить кривые на легенде и нажать кнопку **Поместить на трек.**

При щелчке мышью на вспомогательном треке, в основном окне происходит переход на соответствующую глубину. При щелчке правой кнопкой мыши на вспомогательном треке, кривые удаляются из трека.

Изменение вертикального масштаба

Вертикальный масштаб выбирается в меню **Масштаб** из следующих значений

1:100, 1:200, 1:500, 1:1000, 1:2000, 1:5000, 1:10000.

Текущий вертикальный масштаб показывается в заголовке окна программы.

Изменение горизонтального масштаба кривых

Выберите режим изменения горизонтального масштаба кривых.

Если нужно увеличить видимую амплитуду кривой нажмите **левую** кнопку мыши на кривой, амплитуда кривой начнет увеличиваться, а когда амплитуда достигнет нужной величины, отпустите кнопку мыши.

Если нужно уменньшить видимую амплитуду кривой нажмите **правую** кнопку мыши на кривой, амплитуда кривой начнет уменьшаться, а когда амплитуда достигнет нужной величины, отпустите кнопку мыши.

Если нужно уравнять горизонтальные масштабы двух или более кривых, выделите их на легенде кривых и нажмите кнопку **Уравнять аттрибуты**.

Изменение толщины кривых

Выберите режим **Толщина кривых**.

Увеличить толщину кривой можно щелчком левой кнопки мыши на кривой.

Уменьшить толщину кривой можно щелчком правой кнопки мыши на кривой.

Изменение цвета кривых

Выберите режим **Цвета кривых**.

Щелкните левой кнопки мыши на нужной кривой и выберите нужный цвет для кривой.

Переключение между именными цветами кривых и цветами по умолчанию выполняется клавишей **F8**.

Изменение имен кривых

Первый способ. Щелкните мышью на свободном месте легенды кривых. Появится таблица с именами кривых. Отредактируйте в таблице имена кривых и нажмите клавишу Esc.

Второй способ. Нажмите кнопку **Имена кривых**.

В открывшемся диалоге отредактируйте имена кривых.

Для автоматической трансляции имен кривых нажмите кнопку **Трансляция**.

При необходимости отредактируйте схему трансляции имен.

Примечание: В именах кривых допустимы буквы латинского и русского алфавита, цифры и знак подчеркивания. Имя кривой должно начинаться с буквы и ограничиваться 10-ю символами.

Перемещение кривых

Перейдите в режим **Перемещение кривых**.

Установите указатель мыши на кривую, которую вы хотите переместить

и нажмите левую кнопку мыши. Переместите кривую в нужное место и отпустите кнопку мыши

Установка границ

Перейдите в режим **Установка границ**.

Поместите указатель мыши в то место, где вы хотите установить границу и нажмите левую кнопку мыши. В указанном месте появится обозначение границы в виде горизонтальной линии.

Для удаления границы поместите на нее указатель мыши и нажмите правую кнопку мыши - граница будет удалена. Удаление всех границ выполняется клавишей **Delete**.

Примечание: В режимах увязки, смещения и растяжки кривых также можно устанавливать границы щелчком левой кнопки мыши, при этом, не указывая на какую-либо кривую.

Выделение интервалов

Перейдите в режим **Выделение интервалов.**

Поместите указатель мыши в то место, где вы хотите установить начало интервал и нажмите левую кнопку мыши. В указанном месте появится обозначение начала интервала в виде горизонтальной линии. Не отпуская кнопку мыши, переместите указатель на конец интервала и отпустите кнопку мыши. Указанный интервал будет выделен цветом.

Если вы хотите удалить какой-либо интервал, щелкните по нему правой кнопкой мыши.

Для удаления всех выделенных интервалов нужно перейти в режим **Выделение интервалов** и нажать клавишу **Delete**.

Коррекция кривых

Перейдите в режим **Коррекция кривых**.

Курсор мыши устанавливается на кривой, которую нужно исправить, и нажимается левая кнопка мыши. Далее проводится нужный контур при нажатой кнопке мыши, после чего левая кнопка отпускается.

*Примечание: Если вы хотите отменить произведенные изменения кривой, нажмите кнопку **Откат**.*

Видимость кривых

После щелчка левой кнопкой мыши на легенде цвета кривой она становится видимой.

После щелчка правой кнопкой мыши на легенде цвета кривой она становится невидимой.

Если нужно включить видимость всех кривых щелкните кнопку **Показать все кривые.**

Если нужно сделать все кривые невидимыми щелкните кнопку **Скрыть все кривые.**

Выбор кривых

Щелкните левой кнопкой мыши на именах нужных кривых.

Имя выбранной кривой показывается голубым цветом.

Повторный щелчок левой кнопкой мыши отменяет выбор кривой.

Если нужно выбрать все кривые, щелкните кнопку **Выбрать все кривые**.

Центрирование кривых

Выберите на легенде нужную вам кривую и нажмите кнопку **Центрировать кривую**.

Данная кривая будет смещена в центр окна.

Увязка кривых

Увязка кривых выполняется следующим образом:

Перейдите в режим **Увязка кривых**.

Установите курсор мыши на опорной кривой и нажмите левую кнопку мыши, затем переместите мышь до увязываемой кривой и отпустите левую кнопку мыши. В месте увязки будет установлена граница.

Примечание:

1. Имееется возможность увязывать одновременно несколько кривых, т.к. выделенные на легенде кривые увязываются синхронно с увязываемой кривой.

2. Находясь в режиме увязки, можно устанавливать границы, не переходя в режим установки границ. Для этого нужно нажать левую кнопку мыши, не указывая при этом на какую-либо кривую.

3. Если вы хотите удалить границу, щелкните по ней правой кнопкой мыши.

4. При увязке дискретных кривых установленные границы игнорируются и кванты перемещаются независимо друг от друга.

Сшивка кривых

Сшивка кривых выполняется следующим образом :

Первый способ (Две кривые перекрываются между собой).

Переместите две сшиваемые кривые так, чтобы в точке сшивки они пересекались.

Перейдите в режим **Сшивка кривых**.

Установите курсор мыши на точке сшивки и нажмите левую кнопку мыши. Будет создана новая кривая, у которой верхняя часть (выше точки на которую указывает курсор мыши) скопирована из вышерасположенной кривой, а нижняя часть скопирована из нижерасположенной кривой.

Второй способ (Кривые могут не перекрываться между собой).

Выделите на легенде кривые подлежащие сшивке (их может быть более двух) и нажмите на правой панели инструментов кнопку **Сшивка кривых**.

Выбранные кривые будут сшиты между собой.

Примечание: Разрывы между кривыми будут заполнены прямыми линиями.

Третий способ (С помощью калькулятора данных).

Напишите в калькуляторе данных следующий текст:

НК = К1 //500 1000
НК = К2 //1000 1200
НК = К3 //1200 2000

Будет создана кривая НК сшитая из соответствующих фрагментов кривых К1, К2 и К3.

Удаление кривых

Щелкните правой кнопкой мыши на имени удаляемой кривой.

Кривая будет удалена.

Удаление фрагмента

Удаление фрагмента выполняется следующим образом:

Перейдите в режим **Удаление фрагмента**.

1. Если вы хотите удалить верхнюю или нижнюю часть интервала или кривой :

Щелкните мышью в месте удаления и выберите часть интервала или кривой, которую нужно удалить.

Если, при щелчке мышью, вы указываете на какую либо кривую, то будет удалена соответствующая часть данных этой кривой.

Если, при щелчке мышью, вы не указываете на кривую, то будет удалена соответствующая часть интервала.

2. Если вы хотите удалить фрагмент кривой или всех кривых находящийся внутри загруженного интервала:

Выделите нужный фрагмент границами. Щелкните мышью внутри интервала.

Если, при щелчке мышью, вы указываете на какую либо кривую, то будет удален выделенный фрагмент данной кривой.

Если, при щелчке мышью, вы не указываете на кривую, то в выделенном фрагменте будут удалены данные всех кривых.

Просмотр значений кривых

Перейдите в режим **Просмотр данных**.

1. Нажмите левую кнопку мыши на нужной кривой и протяните мышь по интересующему вас интервалу. На экране будут отображаться значения кривой. Для окончания просмотра отпустите кнопку мыши.

2. Нажмите правую кнопку мыши на нужной кривой. На экране будет выведена информация по данной кривой.

3. Если вы нажали кнопку мыши не на кривой, то возле курсора мыши будет показываться значение текущей глубины, а на легенде кривых их текущие значения.

Инвертирование кривых

Выберите на легенде нужные вам кривые и нажмите кнопку **Инверсия кривой**. Будут созданы инвертированные кривые с префиксом in.

Реверсирование кривых

Выберите на легенде нужную кривую и нажмите кнопку **Обратная кривая**. Будет создана новая кривая с префиксом r. Зависимость между новой и исходной кривой выражается формулой y = 1/x, где y - значения новой кривой, x - значения исходной кривой.

Примечание: Сложные математические преобразования кривых нужно выполнять в калькуляторе данных.

Логарифмирование кривых

Выберите на легенде исходную кривую и нажмите кнопку **Логарифм кривой**. Будет создана логарифмированная кривая с префиксом lg.

Зависимость между новой и исходной кривой выражается формулой y = lg(x), где y - значения новой кривой, x - значения исходной кривой.

Если кривая содержит отрицательные значения, то будет сообщено об отказе от логарифмирования данной кривой.

Примечание: Сложные математические преобразования кривых нужно выполнять в калькуляторе данных.

Потенцирование кривых

Выберите на легенде нужную кривую и нажмите кнопку **Потенцирование кривой**.

Будут создана новая кривая с префиксом p. Новая кривая и исходная кривые

связаны между собой функцией y = 10^x, где y - значение новой кривой, x - значение

исходной кривой. Если исходная кривая содержит значения больше 6.0, то потенцирование не выполняется.

Примечание: Сложные математические преобразования кривых нужно выполнять в калькуляторе данных.

Нормирование кривых

Выберите на легенде нужную кривую и нажмите кнопку **Нормирование кривой**.

Будут создана новая кривая с префиксом n.

Новая кривая (НК) связанная с исходной кривой (ИК) зависимостью

НК = (ИК - ИКmin) / (ИКmax - ИКmin) , где ИКmin - минимальное значение кривой ИК;

ИКmax - максимальное значение кривой ИК. Т.е. новая кривая будет нормирована в пределах от 0 до 1, что часто используется при создании кривых относительных параметров, таких как АПС, ДГК и пр.

Примечание: Если не установлено ни одной границы, то значения минимума и максимума будут постоянными величинами для всей кривой. Если установлены границы, то значения минимума и максимума будут своими для каждого интервала, лежащего между границами.

Примечание: Если нужно нормировать кривую по модулю отличному от 1, то нужно использовать

функцию Нормированная кривая в диалоге Преобразования кривых.

Кривая средних значений

Выберите на легенде нужную кривую и нажмите кнопку **Средняя кривая**.

Будут создана новая кривая с префиксом m.

Новая кривая (НК) связанная с исходной кривой (ИК) зависимостью НК = ИКmid , где ИКmid - среднее значение кривой ИК;

Примечание: Если не установлено ни одной границы, то среднее значение будет постоянной величиной для всей кривой. Если установлены границы, то средние значения будут своими для каждого интервала, лежащего между границами.

Дублирование кривых

Выберите на легенде нужные вам кривые и щелкните кнопку **Дубликат кривой**. Будут созданы дубликаты выбранных вами кривых.

Копирование фрагмента кривой

Выделите нужный вам фрагмент кривой границами. Нажмите клавишу **Ctrl**, щелкните левой кнопкой мыши на клонируемой кривой и, не отпуская кнопку мыши, перетащите клонированный фрагмент кривой в нужное вам место. Отпустите кнопку мыши. Будет создана новая кривая представляющая собой копию фрагмента клонируемой кривой.

Примечание: Если вы не установили границы, то кривая будет скопирована целиком.

Вставка фрагмента кривой

Выделите нужный вам фрагмент кривой границами. Нажмите клавишу **Shift**, щелкните левой кнопкой мыши на вставляемой кривой и, не отпуская кнопку мыши, переместите курсор мыши до кривой, в которую нужно вставить фрагмент. Отпустите кнопку мыши.

Фрагмент первой кривой будет вставлен во вторую кривую.

Примечание: Если вы не установили границы, то кривая будет скопирована целиком.

Удаление выбросов

Выберите на легенде нужные кривые и нажмите кнопку **Устранить выбросы**.

Примечание: Устраняются выбросы длиной не более 2-х квантов.

Устранение разрывов

Выберите на леленде кривые имеющие разрывы и нажмите кнопку **Заполнить разрывы.**

Примечание: Заполняются разрывы записи длиной не более 2-х квантов.

Закраска областей кривых

1. Закраска отдельных кривых.

Первый способ. Выберите на легенде кривые подлежащие закраске и нажмите кнопку **Закраска Кривых**. Цвет закраски зависит от значений кривой, которые могут быть больше или меньше значения перехода. Значение перехода по умолчанию принимается равным среднему значению кривой. Для того чтобы изменить значение перехода выберите режим **Перемещение кривых**, нажмите левую кнопку мыши на линии перехода и переместите ее в нужное место. Для изменения цвета закраски выберите режим **Цвета кривых**, щелкните мышью по нужной области закраски и выберите желаемый цвет закраски.

Второй способ. Выберите в меню **Данные** команду **Закраска областей**. В разделе **Одиночные кривые** отметьте кривые подлежащие закраске и выберите для каждой из отмеченных кривых значение перехода и цвета закраски.

2. Закраска между двумя кривыми.

Первый способ. Выберите на легенде две нужные вам кривые и нажмите кнопку **Закраска между кривыми**. Цвет закраски зависит от значений кривых, которые могут быть больше, меньше или равны между собой. Для изменения цвета закраски выберите режим **Цвета кривых**, щелкните мышью по нужной области закраски и выберите желаемый цвет закраски.

Второй способ. Выберите в меню **Данные** команду **Закраска областей**. В разделе **Парные кривые** выберите две кривые подлежащие закраске между собой и установите нужные цвета закраски.

Примечание:

1. Для закраски одиночных кривых можно выбирать любое число кривых.

2. Для закраски между кривыми можно выбрать только две кривые.

3. Если закраска кривых больше не нужна, нажмите кнопку **Отмена закраски**.

Калькулятор данных

Для вызова калькулятора данных нажмите кнопку **Калькулятор данных** или выберите команду **Калькулятор данных** из меню **Функции**.

Калькулятор данных предназначен для арифметических преобразований кривых. Калькулятор поддерживает 5 действий (+, -, *, /,^), 8 функций (Abs, Ln, Lg, Exp, Sin, Cos, Tg, Ctg) и 4 константы (Min, Max, Mid, Null).

В качестве функций можно использовать однослойные и многослойные палетки. Допускается использование скобок.

В выражениях можно использовать имена кривых (имя кривой глубин H) и имена палеток.

Для выполнения преобразования в определенном интервале нужно после формулы преобразования поставить две косых черты // и после них ввести интервал, в котором будет выполняться преобразование. Пример НК = ИК+20 // 1200 - 1500 или НК = ИК+20 // 1200 1500

Чтобы закоментировать строку нужно поставить в начале строки две косых черты //.

Чтобы удалить кривую после выхода из калькулятора нужно в начале строки поставить знак дефиса.

Если вы записываете в одной строке более одного выражения, то они должны быть отделены друг от друга точкой с запятой.

Имя кривой можно ввести в текст формулы, щелкнув на ее имени в списке кривых.

Тексты алгоритмов можно сохранять в файлах и загружать из файлов.

Примеры написания формул преобразования:

// Это комментарии к алгоритму расчета

// Строка, которая начинается символами //, не выполняется

X1 : lg(12.15)-lg(7.20) { так вычисляются константы }

*X2 : X1 * 1.80; X3 : X1+X2 { так вычисляются константы }*

КС = 25.30

НГК = Null // 2500 3000 { присвоить нулевые значения в интервале 2500 - 3000 м }

*К2 = (25.30*1.23)+14.90*

ДТ = Т2 - Т1 // 1200 -1800 { выполнить выражение в интервале 1200 - 1800 м }

ДС = (ДС1+ДС2)/2

АПС = (ПС-Min(ПС))/(Max(ПС)-Min(ПС))

*К1 = (ДС*1.2) + (ПС/2.14)*

*Р = (Dp*H)/10*

НК = PalName(K1)

Преобразования кривых

Выберите команду **Преобразования кривых** из меню **Функции**.

В открывшемся окне доступны 9 видов функциональных преобразований кривых.

1. Сглаживание кривой
2. Сдвиг кривой
3. Удаление выбросов
4. Введение поправки за скин-эффект
5. Выравнивание сползания
6. Создание огибающей кривой
7. Статистический синтез кривой
8. Линейный синтез кривой
9. Нормирование кривой

При работе с любой функцией необходимо выполнить 4 операции:

1. Выбрать закладку нужной функции.

2. Выбрать из списка исходную кривую.

3. Вввести запрашиваемые параметры преобразования.

4. Нажать кнопку OK.

Все функции создают новую кривую на базе выбранной вами исходной кривой, поэтому все функции имеют поле для ввода имени новой кривой. Если предлагаемое по умолчанию имя новой кривой не устраивает вас, введите другое имя кривой.

Рассмотрим работу с каждой функцией более подробно.

1. Сглаживание кривой

Введите имя новой кривой.

Введите число точек осреднения.

Введите число проходов по кривой.

Нажмите кнопку OK.

Примечание: Сглаживание кривой происходит за счет осреднения каждой точки с соседними точками; так при числе точек осреднения равном 3 каждая точка вычисляется как сумма самой точки с вышерасположеной и нижерасположенной точками деленная на 3.

Чем больше число точек осреднения и число проходов (повторений) тем более сглаженной получается выходная кривая.

2. Сдвиг кривой

Введите имя новой кривой.

Введите величину сдвига по глубине (в метрах).

Введите величину сдвига по значению.

Нажмите кнопку OK.

Примечание: Сдвиг по глубине должен быть положительным числом при сдвиге кривой вниз или отрицательным числом при сдвиге кривой вверх.

3. Удаление выбросов

Введите имя новой кривой.

Введите величину максимально допустимого градиента.

По умолчанию эта величина равна утроенному среднему градиенту.

Нажмите кнопку OK.

Примечание: Устраняются выбросы, не превышающие по глубине 2-х шагов квантования.

4. Введение поправки за скин-эффект

Введите имя новой кривой.

Нажмите кнопку OK.

Будет создана новая кривая с введенной поправкой за скин-эффект.

5. Выравнивание сползания

Введите имя новой кривой.

Введите величину уровня привязки.

Нажмите кнопку OK.

Примечание: Перед обращением к данной функции необходимо установить границы в точках, по которым будет происходить выравнивание сползания.

6. Создание огибающей кривой

Введите имя новой кривой.

Введите максимальное число точек.

Выберите сторону огибания (левую или правую).

Нажмите кнопку OK.

Примечание: При выборе правой стороны происходит огибание по точкам максимумов кривой. При выборе левой стороны происходит огибание по точкам минимумов кривой.

Если число точек между экстремумами кривой меньше заданного числа точек, то между точками экстремумов выполняется линейная интерполяция.

Если число точек между экстремумами кривой больше заданного числа точек, то кривая между этими экстремумами остается без изменений.

7. Статистический синтез кривой

Введите имя новой кривой.

Введите среднее значение кривой.

Введите среднее квадратичное значение кривой.

Нажмите кнопку OK.

Будет создана новая кривая, отличающаяся от исходной заданными средним и средним квадратичным значениями.

8. Линейный синтез кривой

Введите имя новой кривой.

Введите значения X1, Y1, X2, Y2.

Нажмите кнопку OK.

Будет создана новая кривая (НК) связанная с исходной кривой (ИК) зависимостью

НК = К*ИК+В, где К:=(y2-y1)/(x2-x1); В:=y2-(К*x2);

9. Нормирование кривой

Введите имя новой кривой.

Введите величину модуля.

Нажмите кнопку OK.

Будет создана новая кривая (НК) связанная с исходной кривой (ИК) зависимостью

НК = М*(ИК - ИКmin) / (ИКmax - ИКmin) , где ИКmin - минимальное значение кривой ИК;

ИКmax - максимальное значение кривой ИК; М – значение модуля. Т.е. новая кривая будет нормирована в пределах от 0 до М, что часто используется при создании кривых относительных параметров, таких как АПС, ДГК и пр.

Примечание:

1. Если не установлено ни одной границы, то значения минимума и максимума будут постоянными величинами для всей кривой. Если установлены границы, то значения минимума и максимума будут своими для каждого интервала, лежащего между границами.

2. Нормировать кривую в пределах от 0 до 1 можно в основном окне программы, используя кнопку ***Нормирование кривой****.*

Точечная кривая

Выберите команду **Точечная кривая** из меню **Функции**.

В открывшемся диалоге введите глубины и значения точек. Далее, введите имя создаваемой кривой, выберите интервал формирования кривой (текущий или реальный), выберите тип формируемой кривой (аналоговая или дискретная) и нажмите кнопку **Создать**. Будет создана новая кривая по заданным точкам. Если выбран дискретный тип кривой, то созданная кривая будет содержать только выбранное число точек на указанных глубинах. Если выбран

аналоговый тип кривой, то между заданными точками будет выполнена линейная интерполяция.

Глубины задаваемых точек могут быть как внутри, так и вне текущего интервала данных.

Если выбран текущий интервал формирования кривой, то кривая будет сформирована в пределах текущего интервала. Если выбран реальный интервал формирования кривой, то кривая будет сформирована в интервале от начального значения глубины до конечного значения глубины, которые указаны в таблице координат точек.

Таблицу можно заполнить данными из дискретной кривой, щелкнув по имени кривой в списке кривых.

Статистика кривых

Нажмите кнопку **Статистика** или выберите команду **Статистика** в меню **Данные**.

Появится диалог с четырьмя закладками **Общие**, **Статистика**, **Границы** и **Интервалы**.

Выберите нужную закладку и просмотрите выведенную информацию.

На закладке **Общие** собраны общие сведения по загруженным данным.

На закладке **Статистика** выводятся статистические данные по кривым.

На закладке **Границы** выведены средние значения кривых в интервалах лежащих между границами.

На закладке **Интервалы** выведены средние значения кривых в выделенных интервалах.

Если вы хотите сохранить в файле интересующую вас информацию, нажмите кнопку **Сохранить**.

Расчет уравнения регрессии

Выберите команду **Уравнение регрессии** из меню **Функции**.

В открывшемся диалоге выберите кривую X, кривую Y и нажмите кнопку **Расчет**. Будет выполнен расчет коэффициента корреляции и уравнения регрессии для выбранных кривых.

Если в качестве кривой X выбрана кривая глубин H, то по уравнению регрессии можно построить кривую Y = A+B*H, где

A и B - коэффициенты указанные в уравнении регрессии, H - кривая глубин. Для создания указанной кривой нажмите кнопку **Кривая**.

Редактирование данных

Нажмите кнопку **Редактор данных** или выберите команду **Редактирование** из меню **Данные**.

Появится окно редактора данных, где можно просматривать и редактировать данные в текстовом виде.

Если на легенде нет выбранных кривых, то в редактор будут загружены все кривые.

Если на легенде есть выбранные кривые, то в редактор будут загружены только эти кривые.

В верхнем поле выводятся имена кривых и их можно редактировать. В основном окне редактора производится редактирование данных в текстовом виде.

Чтобы изменить шаг квантования данных введите в поле **Шаг квантования** новое значение шага и нажмите кнопку **Сменить шаг**.

Примечание: Имеется возможность запустить редактор данных так, чтобы после его запуска была выделена строка, соответствующая определенной точке интервала. Для этого нужно нажать кравишу **Alt** и щелкнуть мышью по интересующей вас точке интервала, не указывая при этом на какую-либо кривую.

Заголовок файла

Выберите команду **Заголовок** файла из меню **Данные**.

В открывшемся диалоге отредактируете нужные разделы заголовка и нажмите кнопку **Запись**.

При сохранении данных эти сведения будут помещены в заголовке файла.

Примечание: Данные заголовка берутся из головного, т.е. первого загружаемого файла.

Единицы измерения кривых

Выберите команду **Единицы измерения** из меню **Данные**.

В таблице с заголовком "В текущем файле" можно ввести или отредактировать единицы измерения загруженных кривых.

В таблице с заголовком "Назначать по умолчанию" можно ввести или отредактировать единицы измерения, которые будут присваиваться кривым, у которых в заголовке файла не указаны единицы измерения.

Карта данных

Для того чтобы вывести карту данных нажмите клавишу **F5** или выберите команду **Карта данных** из меню **Данные**.

Карта данных представляет собой "взгляд сверху" на весь загруженный интервал и бывает особенно полезна при загрузке нескольких файлов с кривыми, лежащими в разных интервалах глубин.

Для того чтобы убрать карту данных нажмите клавишу **Escape**.

Кросс - графика

Выберите команду **Кросс - графика** из меню **Функции**.

Для построения кросс-плота выберите из списков кривые X, Y и, если нужно, кривую Z. В списке **Z - уровни** значения кривой Z разбиты на 10 уровней от минимального до максимального значения. Любые уровни кривой Z можно включать и выключать из построения. В списке **Кратно** выберите кратность выбора точек для построения. Если выбрана кратность 1, то для построения выбираются все точки кривых, при кратности 2 выбирается каждая вторая точка, при кратности 3 выбирается каждая третья точка и т. д. В списке **Размер** выбирается размер точек для отрисовки графика. Для выбора цвета точек нажмите кнопку **Цвет точек**. Для выбора цвета фона нажмите кнопку **Цвет фона**. Для печати графика нажмите кнопку **Печать**, заполните, если нужно, подпись к рисунку и нажмите кнопку **ОК**.

Редактирование файлов

Программа LEXX имеет встроенный текстовой редактор, специализированный на редактирование LAS и ASCII файлов.

Для вызова редактора выберите команду **Редактор Las файлов** из меню **Файл.**

Щелкните мышью в списке файлов на имени нужного файла и данный файл будет загружен в окно редактора, где его можно редактировать как обычный текстовой файл.

Ввод и редактирование палеток

Программа LEXX имеет встроенный редактор палеток, который позволяет создавать и редактировать однослойные и многослойные палетки, а также просматривать палетки в графическом виде, т.е. в виде палеточных кривых.

Максимальное число точек в одном слое - 200.

Максимальное число слоев в палетке - 10.

Созданные палетки можно использовать в калькуляторе данных для палеточных преобразований кривых.

Пример вычислений в калькуляторе данных с использованием однослойной палетки:

НК = PalName(ИК)

Пример вычислений в калькуляторе данных с использованием многослойной палетки:

НК = PalName(ИК1,ИК2)

где НК - новая кривая; PalName - имя палетки; ИК, ИК1 и ИК2 - исходные кривые.

Примечание: Имя палетки совпадает с именем файла (без расширения .pal) в котором хранится палетка. Например, если палетка хранится в файле bkz.pal, то имя палетки bkz.

Для вызова редактора палеток выберите команду **Редактор палеток** из меню **Утилиты**.

Порядок создания новой палетки:

1. Введите в поле "Палетка" имя палетки.
2. Введите в поле "Массив X" имя переменной X.
3. Введите в поле "Массив Y" имя переменной Y.
4. Если палетка многослойная введите в поле "Массив Z" имя переменной Z.
5. Введите количество точек в слое.
6. Если палетка многослойная введите количество слоев и значения переменной Z для каждого слоя.
7. Нажмите кнопку **Новая палетка**. Будет создана пустая таблица с указанными вами параметрами.
8. Заполните таблицу палеточными значениями.
9. Введите краткое описание палетки в поле над таблицей.
10. Нажмите кнопку **Запись**.

Если значения какой-либо переменной изменяются с регулярным шагом, то можно ввести значение этого шага в поле "Шаг" и заполнить столбец таблицы нажатием кнопки **Далее**.

Порядок редактирования палетки:

1. Выберите палетку из списка файлов. Палетка будет загружена в таблицу.
2. Отредактируйте таблицу.
3. Нажмите кнопку **Запись**.

Нажав кнопку **Графика**, вы сможете посмотреть палетку в графическом виде. Нажатие кнопки **Таблица** вернет вас к табличному виду палетки.

Алгебраический калькулятор

Для запуска калькулятора выберите команду **Алгебраический калькулятор** из меню **Утилиты**. Калькулятор содержит два окна: левое окно для ввода текста и правое окно для вывода результатов вычислений.

В записываемых выражениях допустимы только буквы латинского алфавита и цифры.

Калькулятор поддерживает 5 действий (+, -, *, /,^) и 8 функций (Abs, Ln, Lg, Exp, Sin, Cos, Tg, Ctg). Допускается использование скобок.

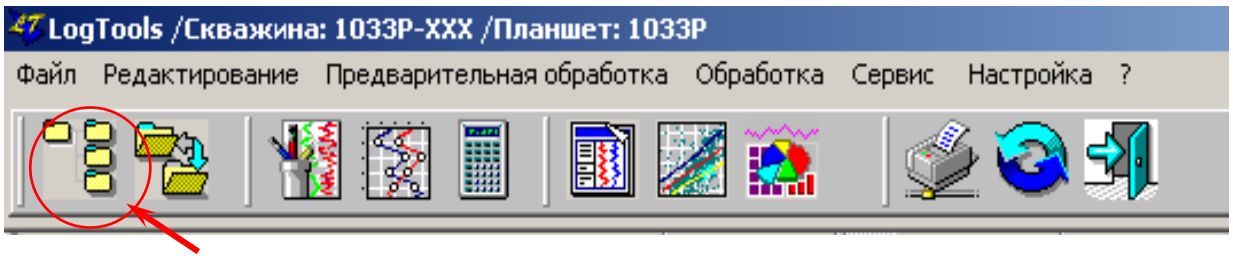
Число и сложность выражений в окне ввода не ограничены.

Точность вычислений выбирается из списка.

. Импорт Las файлов

Для того чтобы провести интерпретацию данных исследования скважин(Las файл) в программе "LogTools", необходимо импортировать исходный файл в формат понятный программе.

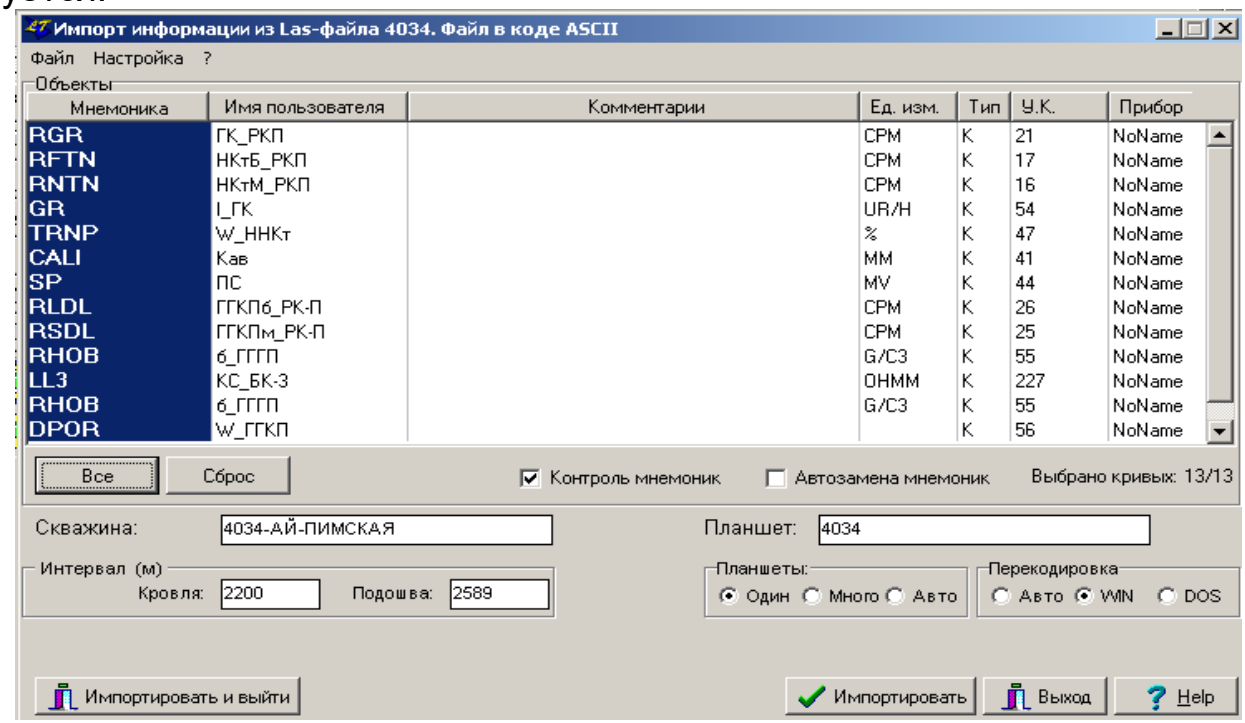
Импорт файла можно произвести из меню, пунктом "импорт" в разделе "файл" меню или кнопкой. В главном рабочем окне программы "LogTools".



После открытия мастера импорта находим и открываем исходный Las файл.

В окне импорта выделяем нужные нам кривые или все сразу (кнопка все).

В низу окна устанавливаем галочки "Контроль мнемоник", перекодировку "Win". Заводим название планшета и скважины, если требуется.



Начать импорт можно кнопками «Импортировать» и «Импортировать и выйти». Во втором случае после завершения импорта программа автоматически откроет рабочий планшет.

В ходе импорта программа будет поочередно спрашивать названия и единицы измерения, которые нужно привести в соответствие с принятыми (программой) обозначениями.

Краткий перечень стандартных обозначений методов и единиц измерений для программы "LogTools" приведен в таблице 2.

Таблица 2

Метод	Обозначение методов	Стандартное обозначение	Единицы измерения
Град-зонд	KS1	GZ1	OHMM

Град-зонд	KS	PZ	OHMM
Обр.г-зонд (Ом·м)	OKS	GZ5	OHMM
Нейтронный метод (Ом·м)	NKT	NLT	
Индукционный метод (мСим)	IL	ILD	MS/M
	KV (KB)	CALI	
Микроптенциао зонд (Ом·м)	MPZ	MPZ	OHMM
Микроградиент зонд (Ом·м)	MGZ	MGZ	OHMM
Потенциалы собс.пол (мВ)	SP	SP	mV
Гамма-метод	GR	GR	UR/H
Индукционный метод	LLD	LLD	OHMM

Названия кривых можно будет исправить на рабочем планшете.

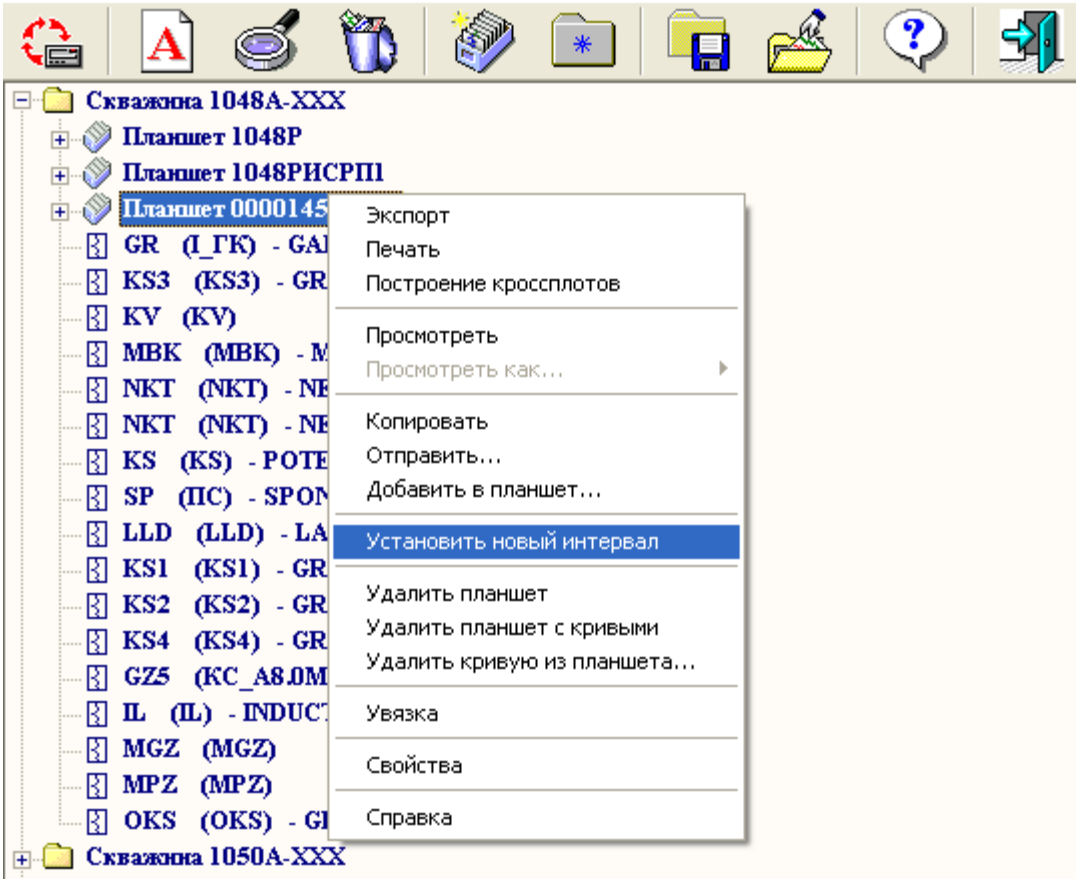
После импорта в «Базе данных» (кнопка  в главном окне LogTools)появится новая скважина и новый планшет.

Над планшетами модно проводить различные операции: устанавливать привязку, корректировать интервал интерпретации, удалять или добавлять кривые в планшет, объединить кривые или планшеты.

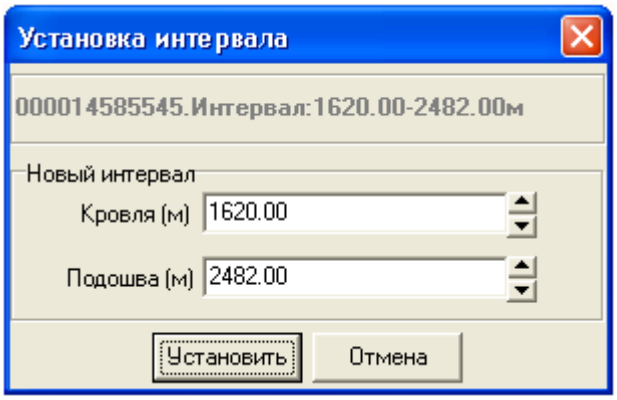
Например:

Установить новый интервал

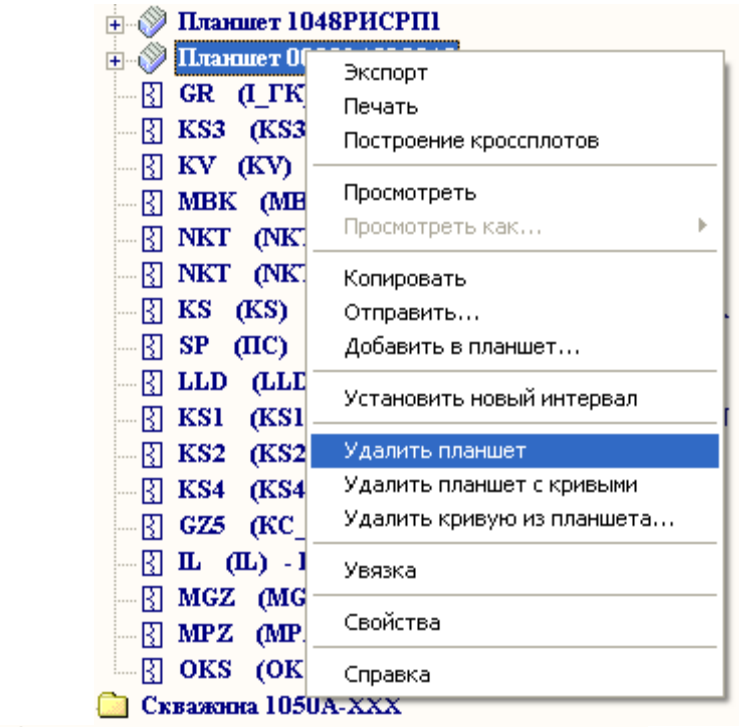
Для этого правой кнопкой мыши открываем контекстное меню на планшете там, где мы хотим установить новый интервал:

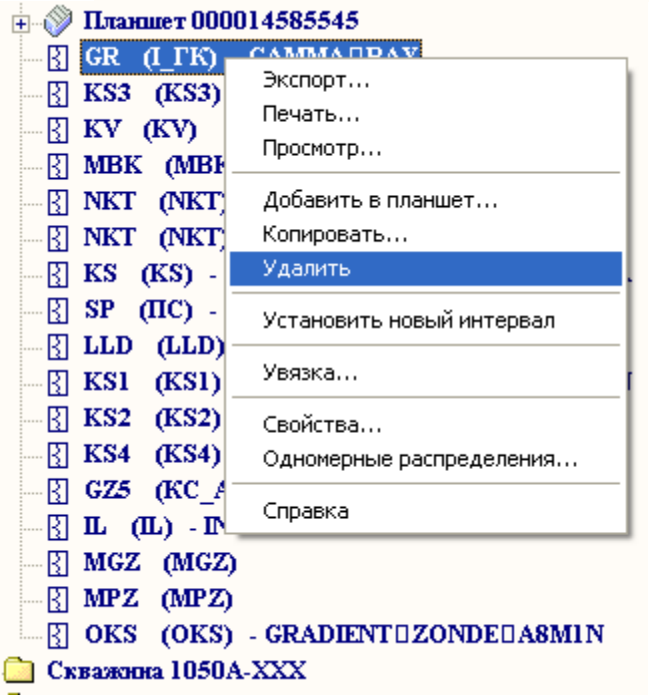


Открывается окно, в котором устанавливается требуемый интервал:



Таким же образом можно удалить кривую или планшет, в зависимости от того какой объект у вас выделен:

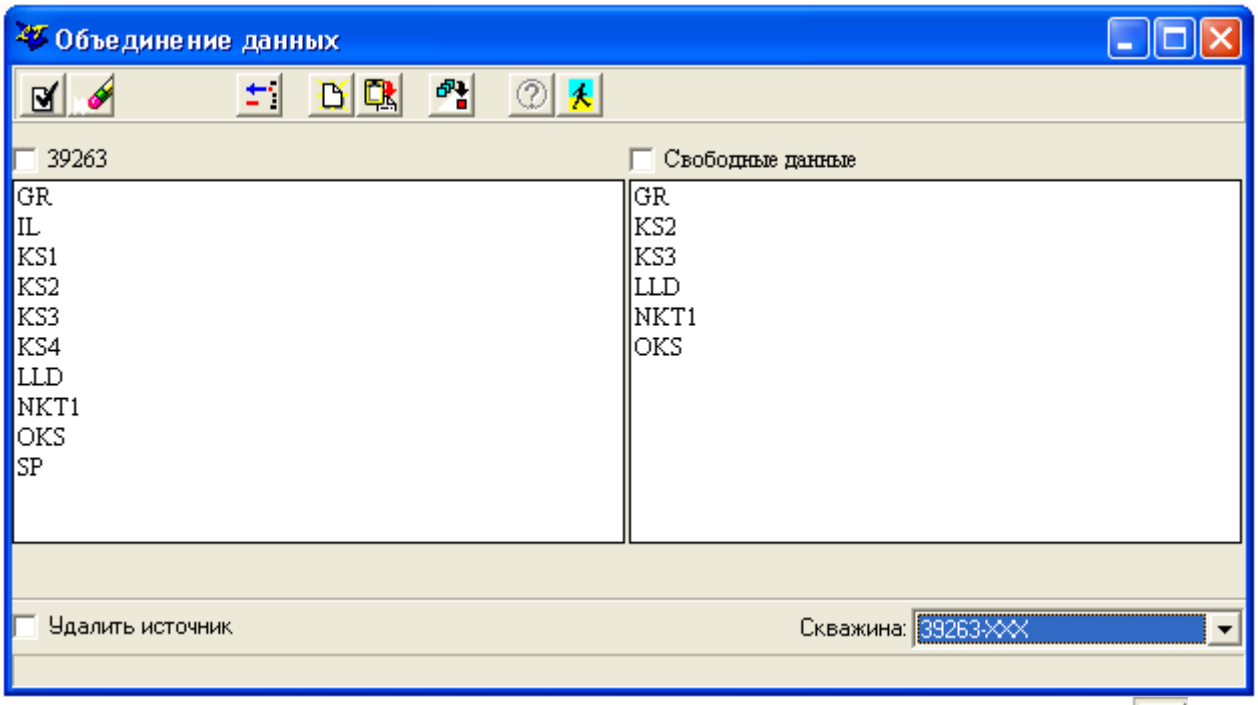




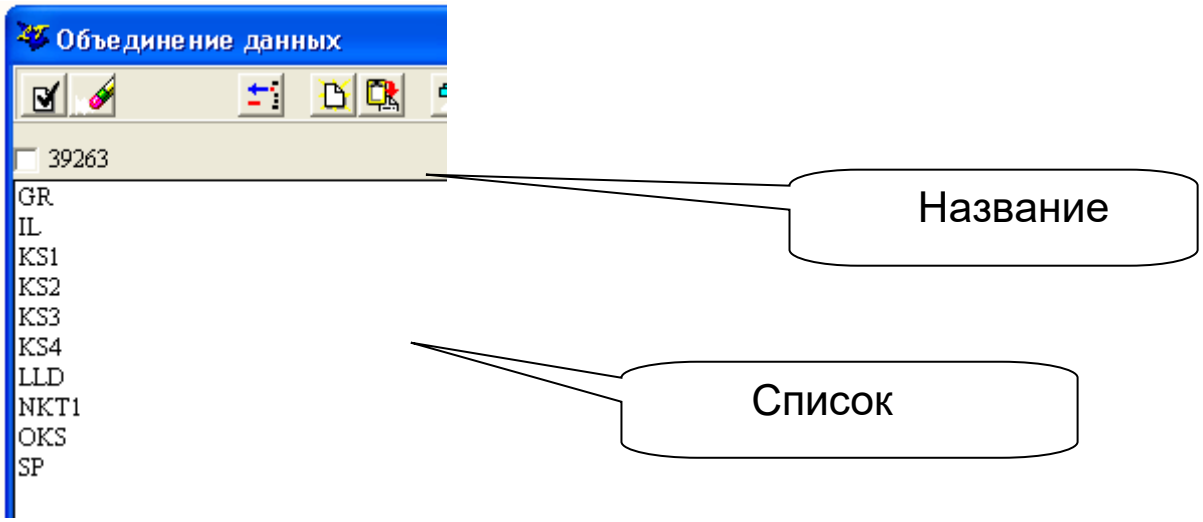
Объединение данных

Для объединения данных открываем окно «Объединение данных» кнопкой 

Откроется окно:



Вверху окна расположены кнопки Выделения всех кривых  и отмены выбора  . Список всех кривых, входящих в планшет расположен под его названием:



Если в скважине есть кривые не входящие ни в один планшет, они расположены в списке “Свободные данные”.

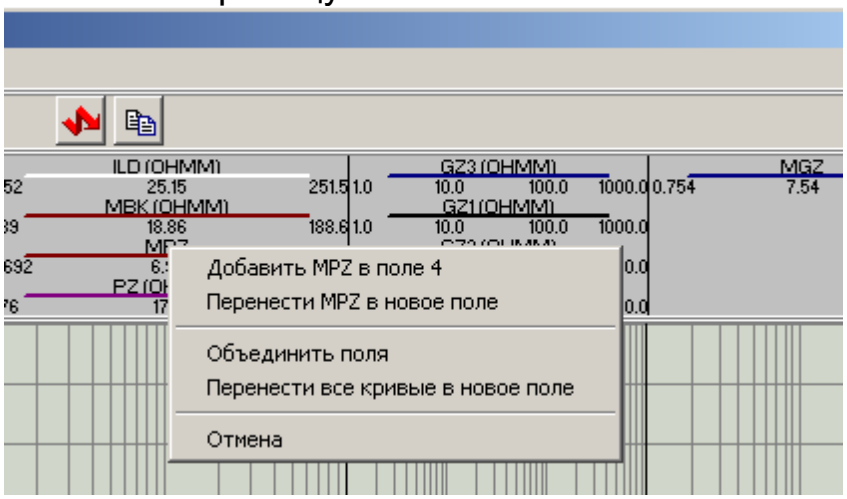
После выделения кривых планшета можно удалить выделенные кривые из планшета -  , объединить выбранные данные в новый планшет -  , добавить выбранные данные в новый планшет -  , склеить выбранные кривые -  .

Для загрузки планшета из базы в окно редактирования достаточно щелкнуть по нему 2 раза мышкой.

3. Подготовка рабочего Планшета

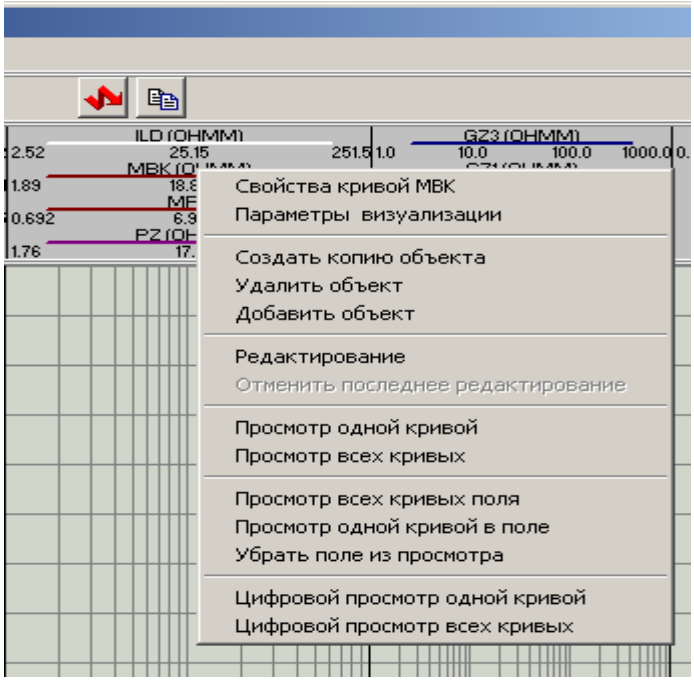
Открыть рабочий планшет для редактирования кнопкой  .

На рабочем планшете в нескольких полях прорисованы полученные после импорта кривые, полученные различными геофизическими методами. Кривые можно переносить в другие поля, зацепив их левой кнопкой мышки и перетащив в нужное поле. Чтобы создать новое поле нужно зацепить кривую правой кнопкой мышки и перенести ей на границу поля. Появится контекстное меню:



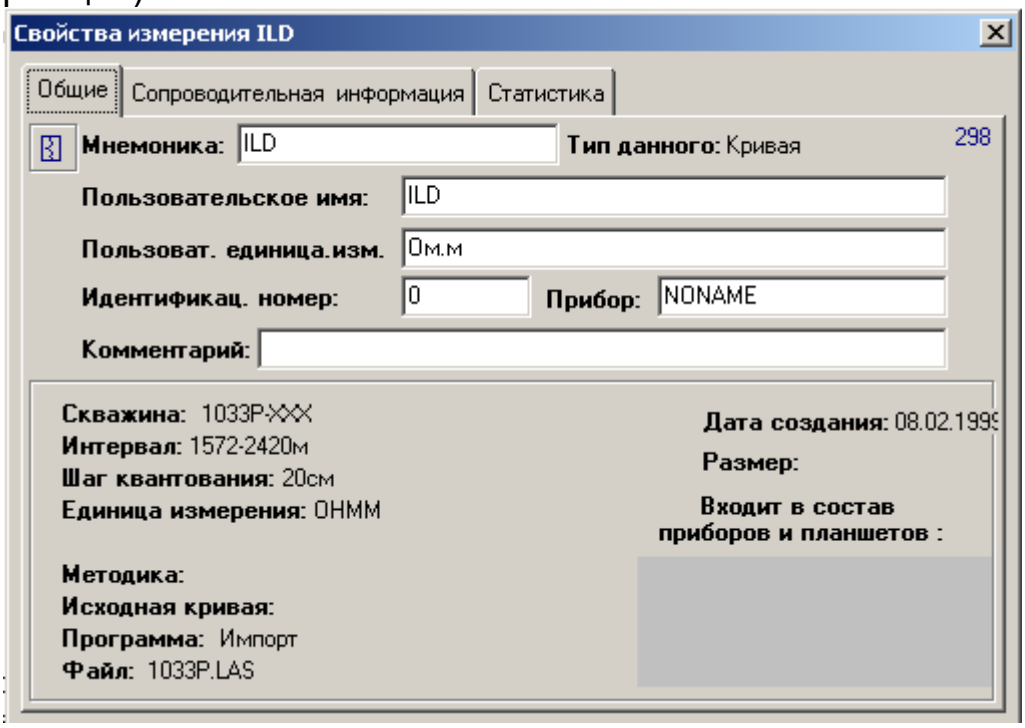
Выбираем нужный пункт (перенести в новое поле).

Чтобы изменять параметры кривых или параметры вывода их на экран, нужно щелкнуть на самой кривой или ей названии правой клавишей мышки. Появится контекстное меню:

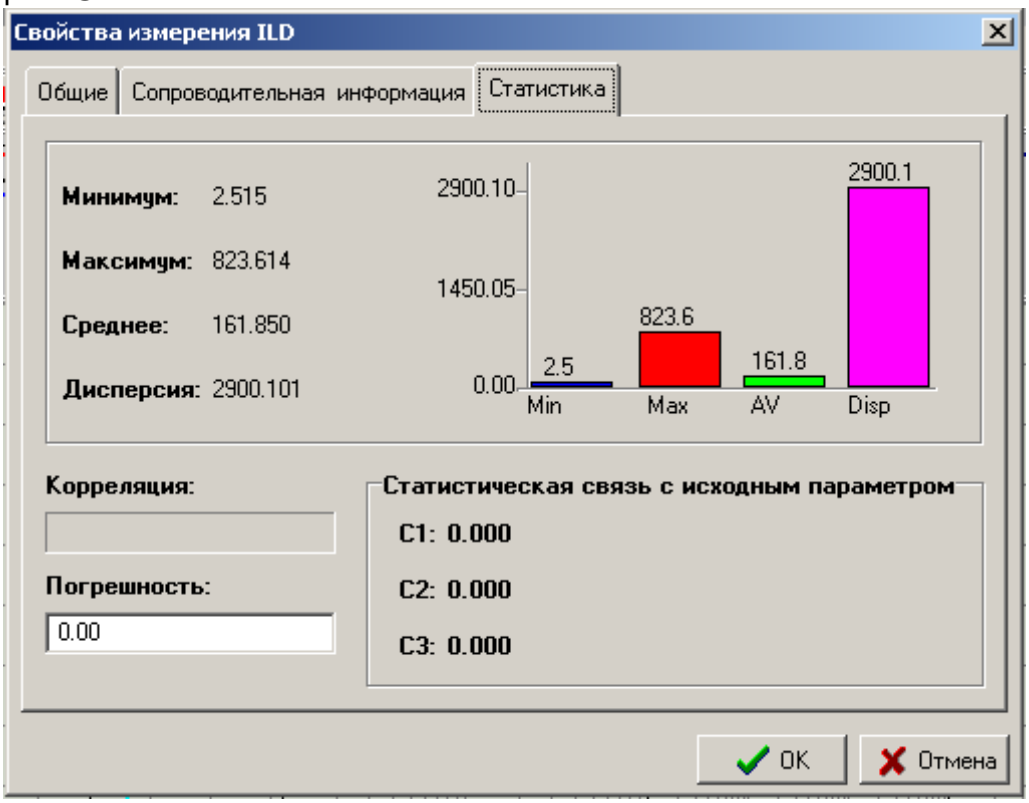


В свойствах кривых можно изменить мнемонику, задать имя и единицы измерения, прибор и комментарии. Можно задать, так же,

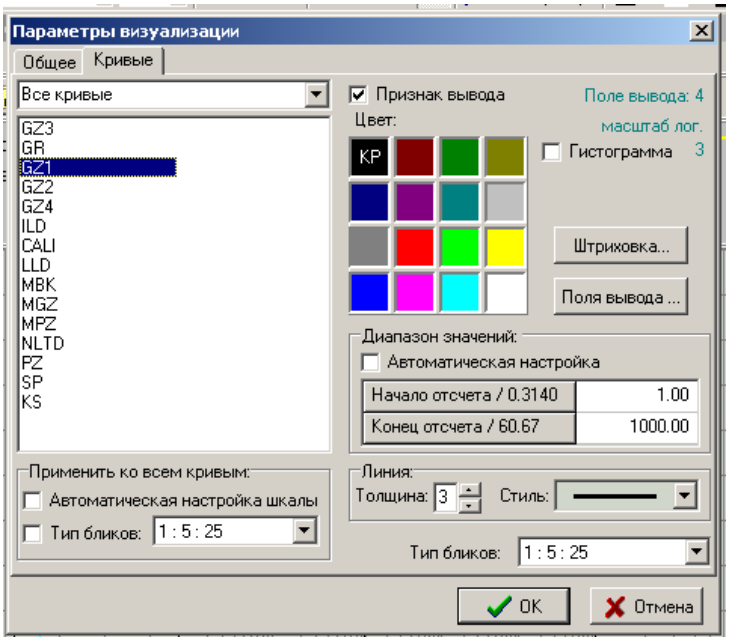
сопроводительную информацию для кривой (вкладка сопроводительная информация).



Статистические данные кривой можно просмотреть на вкладке "Статистика".



Изменить цвета кривых, масштабы полей и т.д. можно в "параметрах визуализации" кривых. Для этого нужно правой кликнуть кнопкой мышки в поле вывода кривых и выбрать в контекстном меню пункт "параметры визуализации", или кнопкой  .



В этом окне можно выбрать цвет и толщину кривых, масштаб их вывода, настройку шкалы (автоматическая или нет), отображение кривой в планшете (признак вывода), штриховку (от начала отсчета, до конца отсчета, до значения, от значения, до кривой) и задать параметры полей вывода (логарифм. или линейная шкала, сетка и т.д.).

Для удобства интерпретации группируем кривые в полях планшета следующим образом:

Кривые ГК(GR) и ПС(SP);

Кривые нейтронных методов (NLT и др);

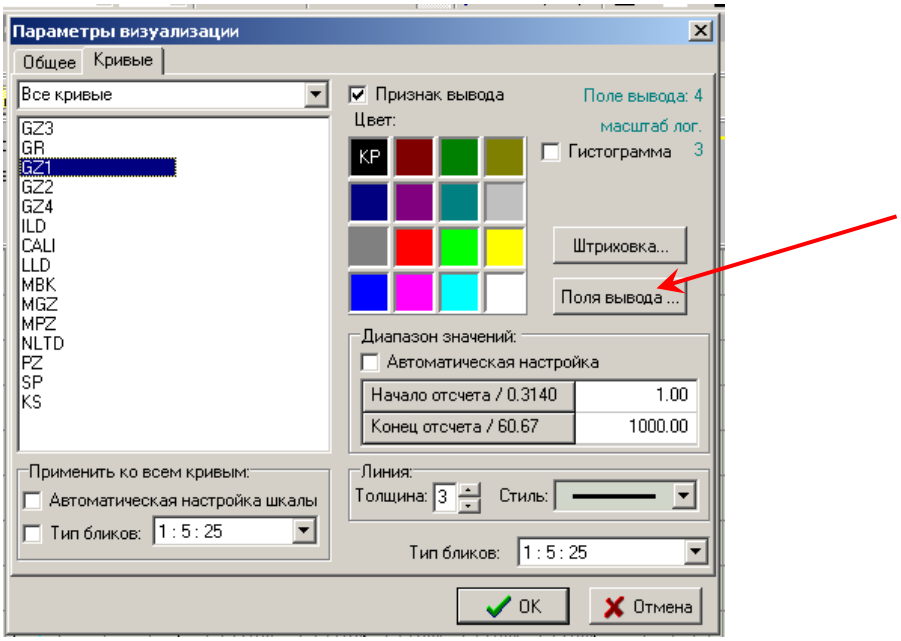
Кривые микрокаротажа MPZ и MGZ;

Кривые каротажа градиент зондов (GZ1-GZ5);

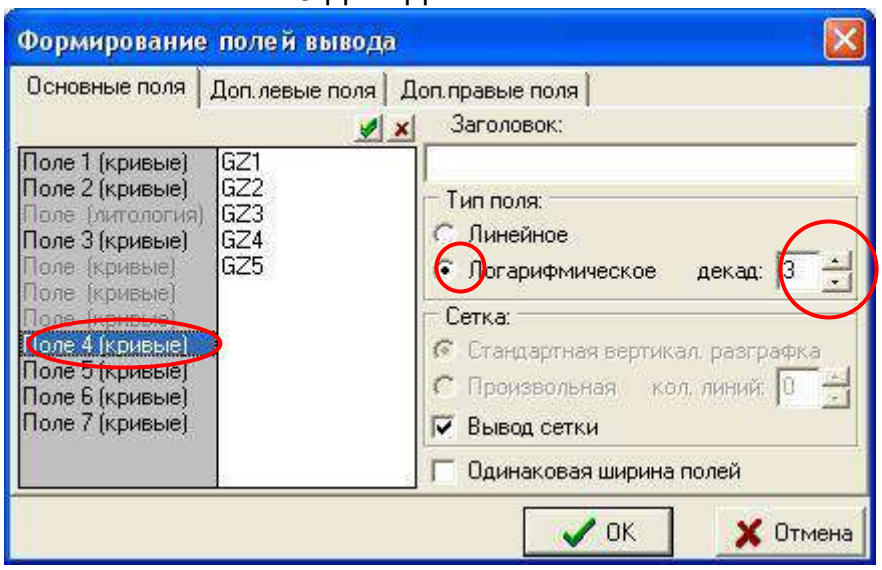
Кривые электрических методов (ILD, PZ, KS и др.).

Масштабы кривых выбираются таким образом, чтобы были явно видны изменения по скважине от максимального до минимального значения.

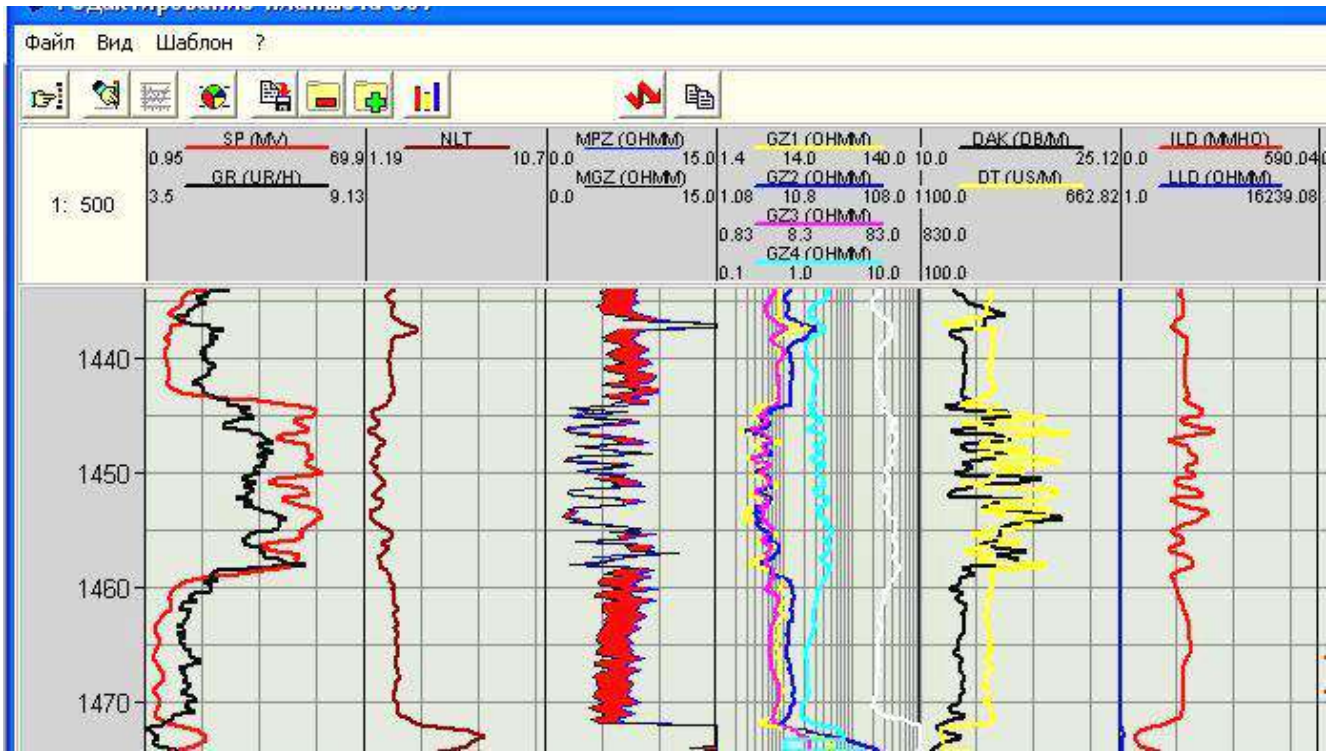
Для полей с электрическими методами необходимо задать логарифмическую шкалу в 3 декады. Для этого в параметрах визуализации выбираем поля вывода:



В нужном поле отмечаем 3 декады.



Кривые в планшете раскрашиваются разными цветами и толщиной для контрастного разделения друг от друга.


Файл Вид Шаблон ?
1: 500
SP (MV)
0.95 69.9
GR (UR/H)
3.5 9.13
NLT
1.19 10.7
MPZ (OHMM)
0.0 15.0
MGZ (OHMM)
0.0 15.0
GZ1 (OHMM)
1.4 14.0 140.0
GZ2 (OHMM)
1.08 10.8 108.0
GZ3 (OHMM)
0.83 8.3 83.0
GZ4 (OHMM)
0.1 1.0 10.0
DAK (DB/M)
10.0 25.12
DT (US/M)
1100.0 662.82
830.0
100.0
ILD (MMHO)
0.0 590.040
LLD (OHMM)
1.0 16239.08
1440
1450
1460
1470

4. Предварительная интерпретация

Интерпретация и обработка скважин осуществляется в три этапа: обучение, экзамен, распознавание.

На этапе обучения необходимо определить критерии, по которым будет происходить автоматическое литологическое расчленение пород.

До начала автоматической интерпретации необходимо выделить наиболее характерные интервалы для всех типов пород, по которым будет происходить литологическое расчленение.

На этапе экзамена сравниваем результаты автоматической интерпретации и результаты предварительной ручной обработки. В случае их качественного совпадения делаем вывод о правильности автоматической интерпретации и приступаем к дальнейшей обработке скважины. В случае отрицательного результата приступаем к поиску причин ошибок.

По найденным интервалам находим все эмпирические величины, необходимые для интерпретации.

Находим интересующие нас параметры (коэфф. пористости, глинистости и тд.) и проводим автоматическое литологическое разделение.

На третьем этапе, производим интерпретацию в автоматическом режиме, сверяясь с ранее полученными результатами.

4.1. Выделение интервалов пород

Для этого по комплексу методов выделяются характерные интервалы пород, которые наиболее точно могут быть интерпретированы. Чем больше комплекс методов используемых для первичной интерпретации, тем точнее будут результаты на данном этапе и конечные результаты интерпретирования.

Литологическое расчленение можно провести по комплексу ГИС – ГК, ПС, НК, электрокаротажа и микробокового зондирования.

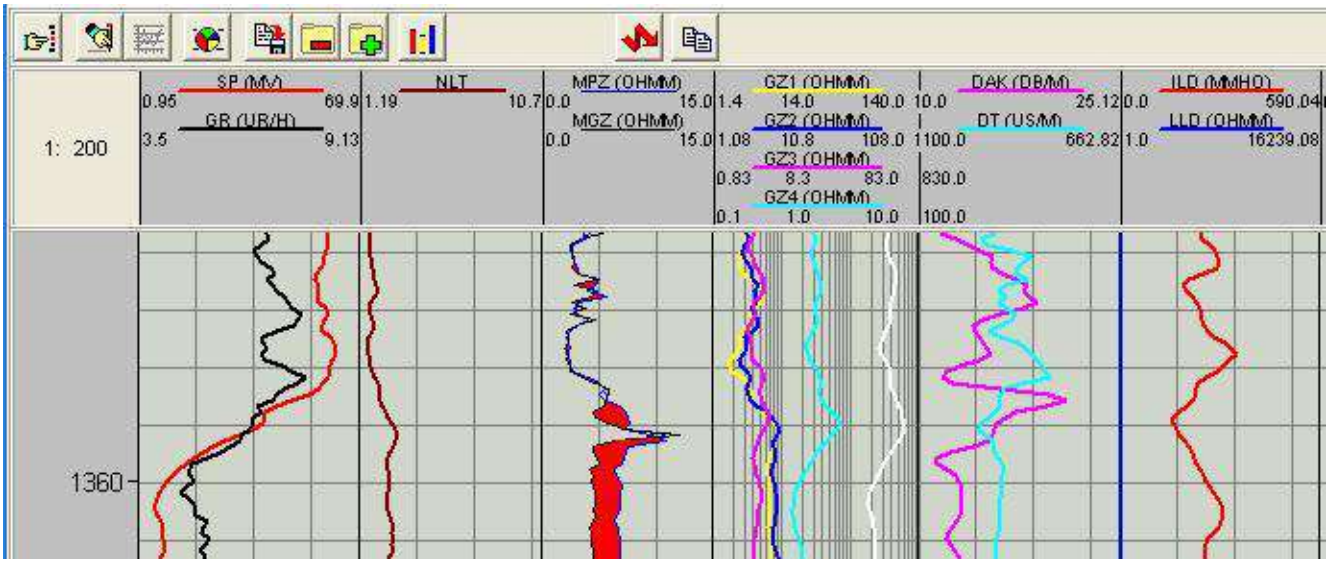
Для удобства выделения интервалов пород на планшете оставляем:

поле с кривыми ГК(GR), ПС(SP);

в поле нейтронных кривых оставляем только NLT;

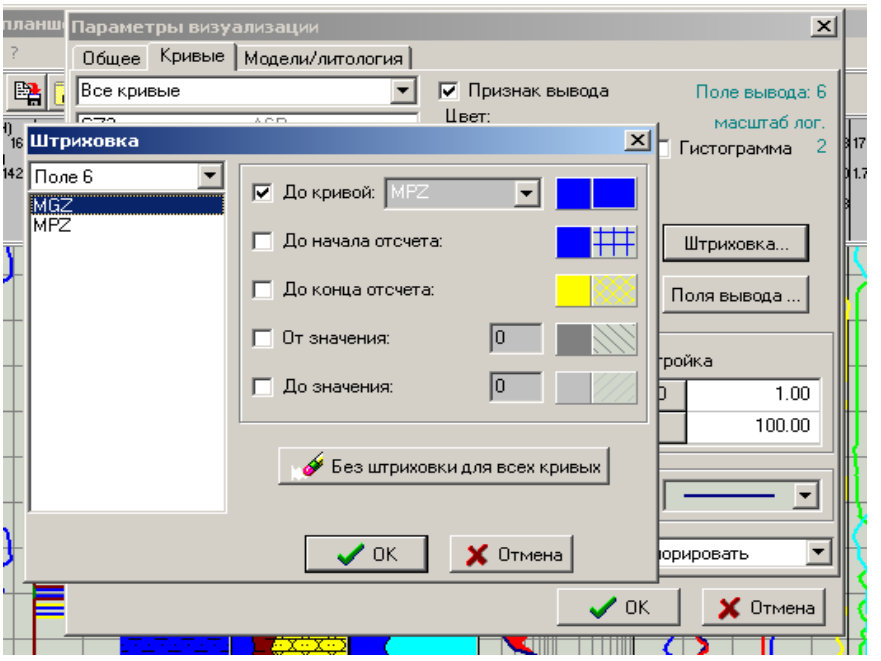
в отдельном поле заштрихуем разницу в показаниях методов MPZ и MGZ;

поле с результатами бокового электрического каротажа.



Для остальных кривых пока можно убрать признак вывода на экран (но не удалять).

Заштриховать превышение одной кривой над другой, можно нажав кнопку «Штриховка» в параметрах визуализации. В открывшемся окне выбираем, по какому критерию проводить штриховку, цвет и тип штриховки.



Далее по комплексу методов ГИС выделяем наиболее характерные интервалы пород.

В таблице 1 приведены критерии для литологического расчленения разреза скважины по данным комплекса методов ГИС.

Таблица 1.

Значения методов / Литология	Гк, мкр/ч	ПС, мВ	НЛТ, усл.ед.	$\rho_к$, Ом/м
Песчаник водоносный	min 3÷5	min 0÷30	промежуточные знач. 1,5÷2	Менее 6
Песчаник нефтеносный	min 3÷5	min 0÷30	пониженные знач. 1,5÷2	> 10
Алевролит	4÷7	30÷70	1÷2	2÷6
Глина (аргелит)	max 5÷12	> 70	1÷1,5 (иногда 2)	< 6
Плотная порода (известняк, доломит)	3÷5	произ-вольная	>3	>10 (10-20 и более)

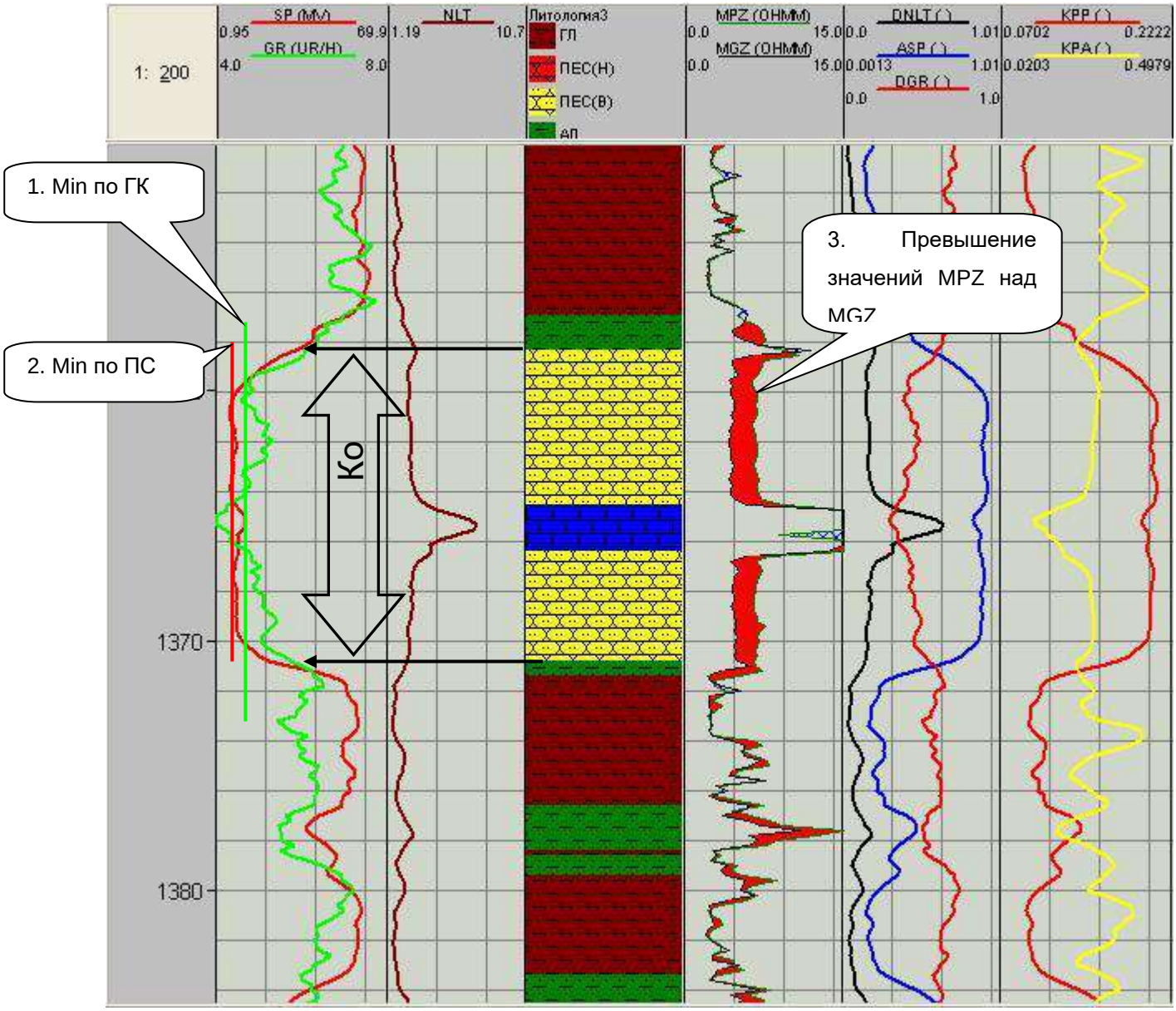
Коллектора (песчаники)

Коллектора (песчаники) выделяются:

по минимальным значениям данных ГК

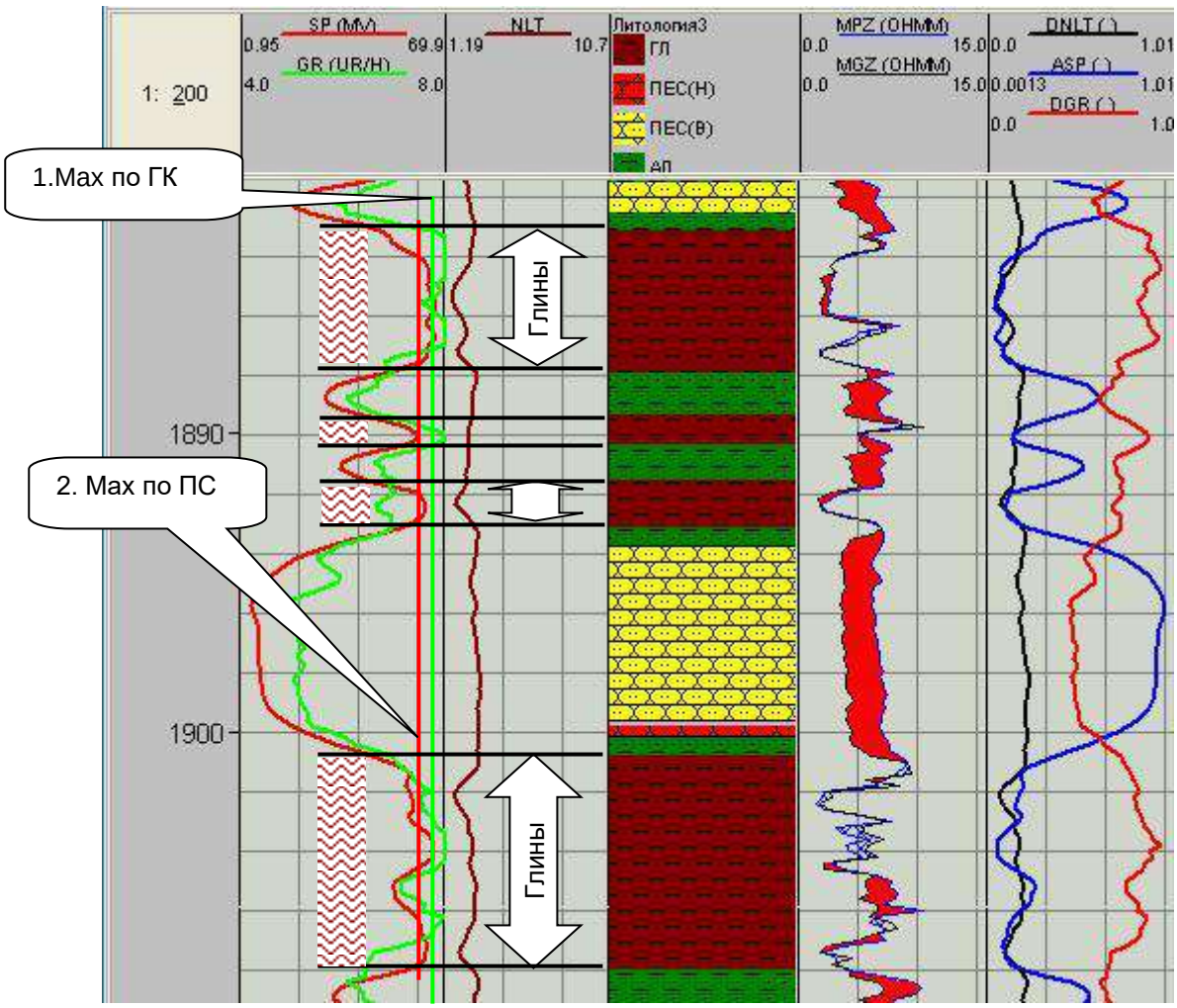
по минимальным значениям данных ПС. Границы пласта выделяются по правилу полумаксимума.

о наличие коллектора говорит разница в показаниях микробокового каротажа – превышение данных микропотенциал зонда (MPZ) над данными микроградиент зонда(MPZ).



Глины

Глины выделяются по:
максимальным значениям ГК(GR);
максимальным значениям ПС(SP).


1: 200
SP (MV)
0.95
69.9
GR (UR/H)
4.0
8.0
NLT
1.19
10.7
Литология3
ГЛ
ПЕС(Н)
ПЕС(В)
АП
MPZ (OHMM)
0.0
15.0
MGZ (OHMM)
0.0
15.0
DNLT ( )
0.0
1.01
ASP ( )
0.0013
1.01
DGR ( )
0.0
1.0
1.Max по ГК
2. Max по ПС
Глины
Глины
1890
1900

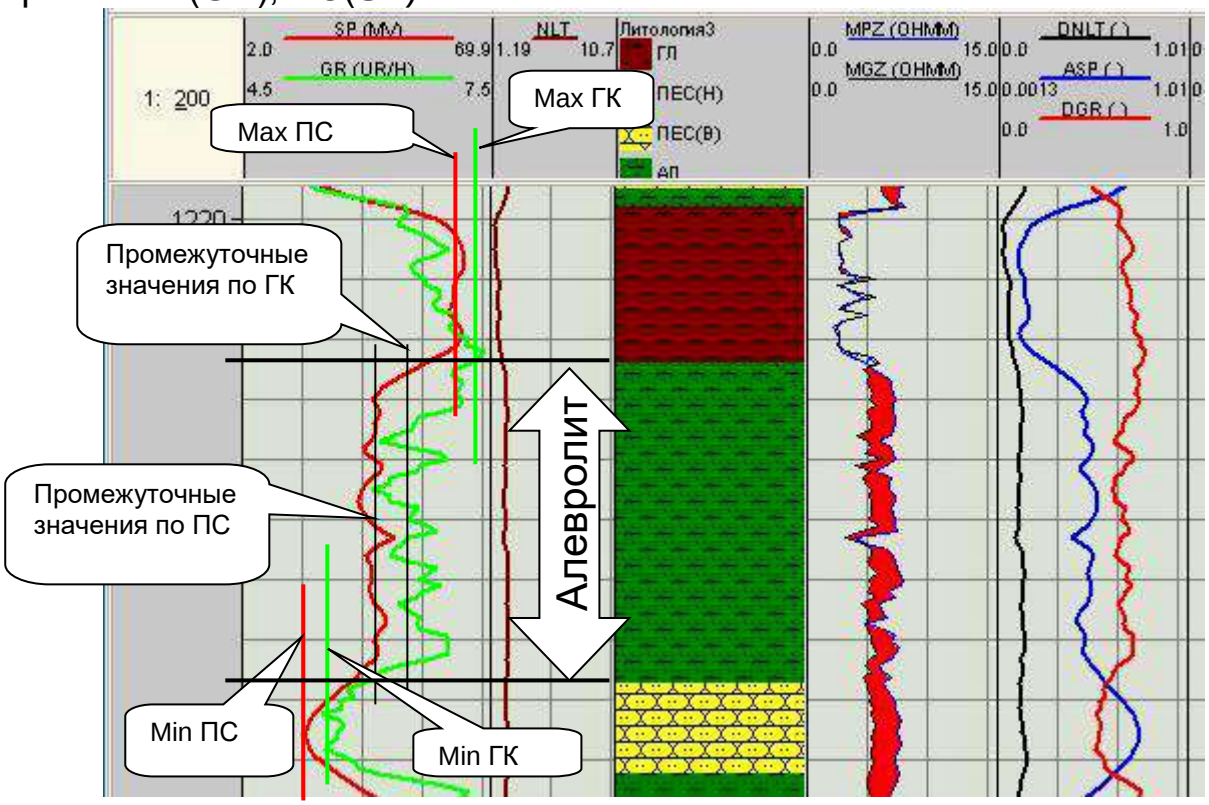
Алевролиты

Алевролиты выделяются:

по промежуточным, между максимальным и минимальным, значениям ГК(GR),

по промежуточным, между максимальным и минимальным, значениям ПС(SP).

Для интервалов алевролитов характерны пилообразные изломы по кривым ГК(GR), ПС(SP).

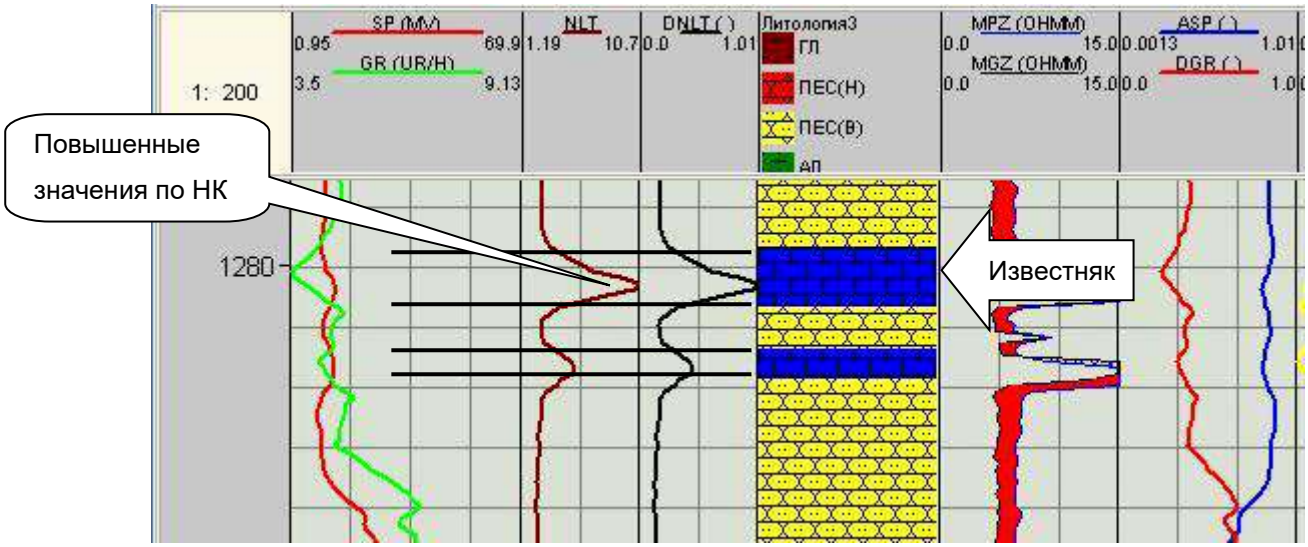


Плотные породы

Плотные породы (известняки, доломиты) выделяются:

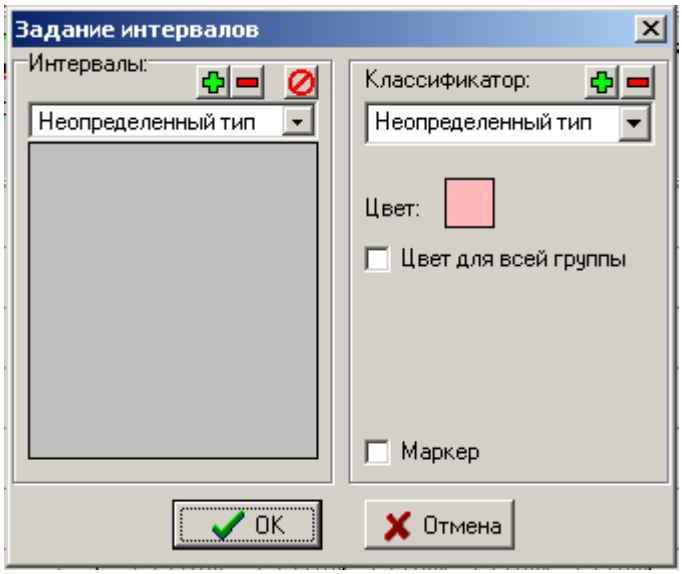
по повышенным значениям NLT

по пониженным значениям ГК(GR).



Порядок выделения интервалов пород

Нажимаем кнопку задания интервалов  . Открывается окно:



Выбираем неопределенный тип, нажав кнопку в левой панели окна задания интервалов. Нажимаем кнопку ОК.

Двойным щелчком отмечаем кровлю и подошву пласта выделяемого типа породы по скважине.

Открываем окно "Задания интервалов" нажав кнопку или щелкнув правой кнопкой мыши по выделенному интервалу. В классификаторе (выпадающий список справа) выделяем нужный нам тип пород (если отсутствует – заводим), выбираем цвет для данной группы пород и устанавливаем галочку - цвет для всей группы.

Аналогично выделяем другие группы пород.

Одновременно можно просмотреть интервалы только одной породы. Интервалы разных пород одновременно просмотреть нельзя.

Рекомендуемые цвета для выделения интервалов пород:
песчаники – желтый;
глины – коричневый;
известняки – синий;
алевролиты – зеленый.

4.2. Контроль правильности выделения интервалов

4.3. Оценка статистических свойств

Оценить правильность выделения интервалов можно на основании статистических зависимостей кривых разных методов. При статистической зависимости различают корреляцию, когда устанавливают существование взаимосвязей между двумя (или более) случайными величинами и оценивают тесноту этой связи и регрессию, когда выясняют характер (форму) зависимости между этими величинами и возможность оценки одной величины по другой.

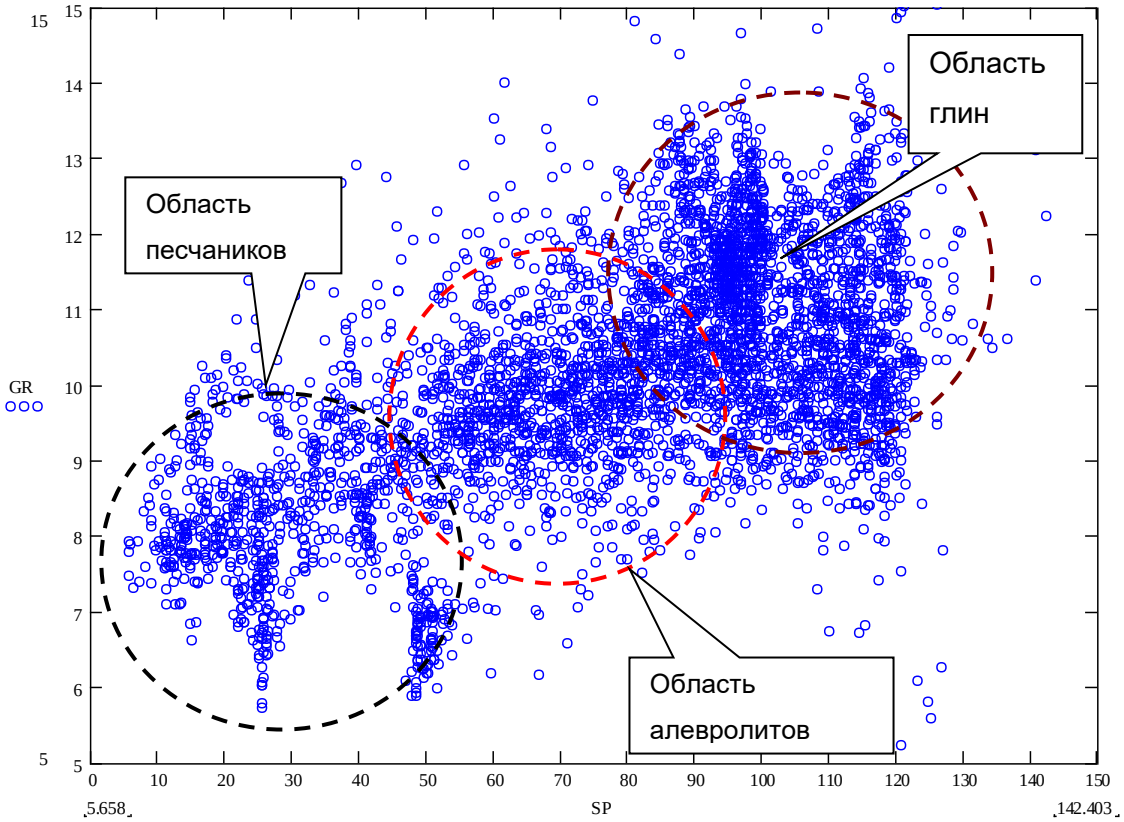
Оценка тесноты связи производится путем расчета коэффициента корреляции, определяющего и степень зависимости между случайными величинами.

При отсутствии связи коэффициент корреляции равен нулю. При коэффициенте корреляции $0,7 < |r_{xy}| < 1$ связи между разными физическими полями устойчивы и обусловлены одним и тем же источником, т.е. аномалии вызваны одним и тем же объектом. При $|r_{xy}| < 0,5$ можно говорить о слабых связях или об их отсутствии, что свидетельствует, например, о различной природе аномалий

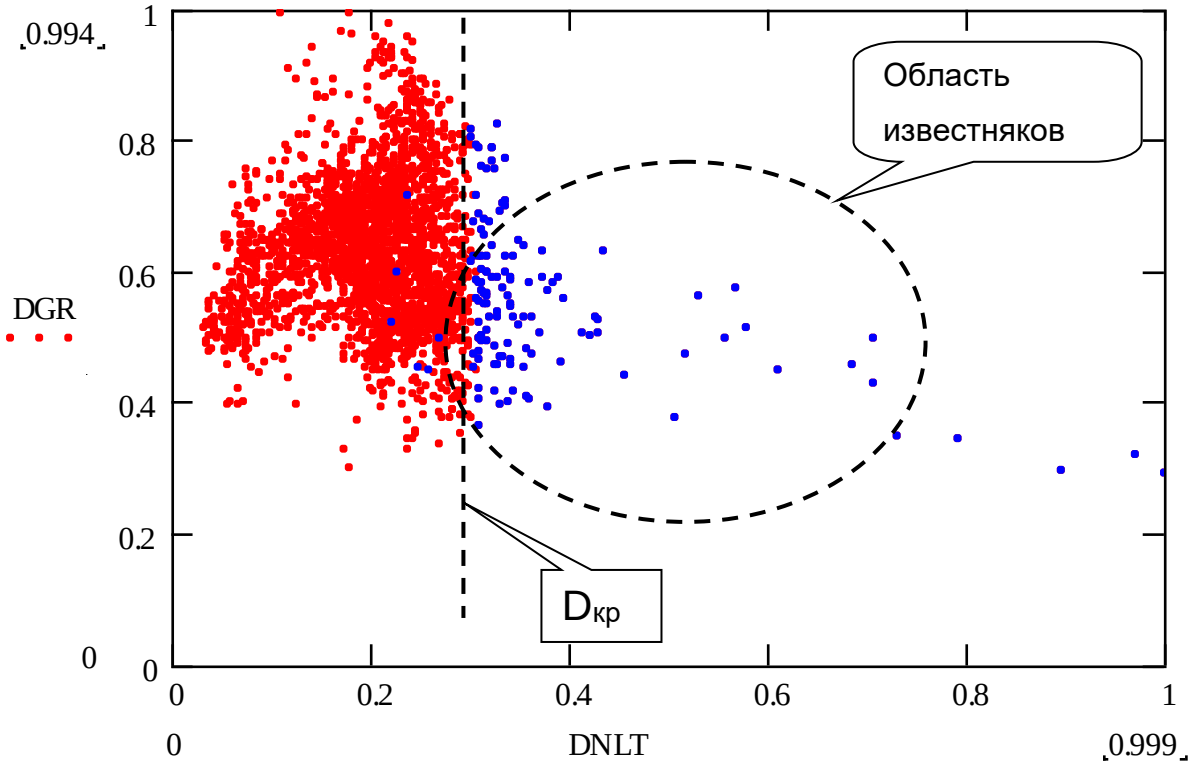
В системе LogTools корреляционные зависимости можно оценить с помощью кроссплотов – кнопка  .

В меню вид выбираем "кроссплот XY + планшет". В выпадающих списках выбираем кривые, отображаемые по оси X и Y. Для отображения на кроссплоте интервалов пород (выделенных ранее) нужно отметить галочку «интервалы» и в окне задания интервалов (кнопка ) выбрать интересующую породу.

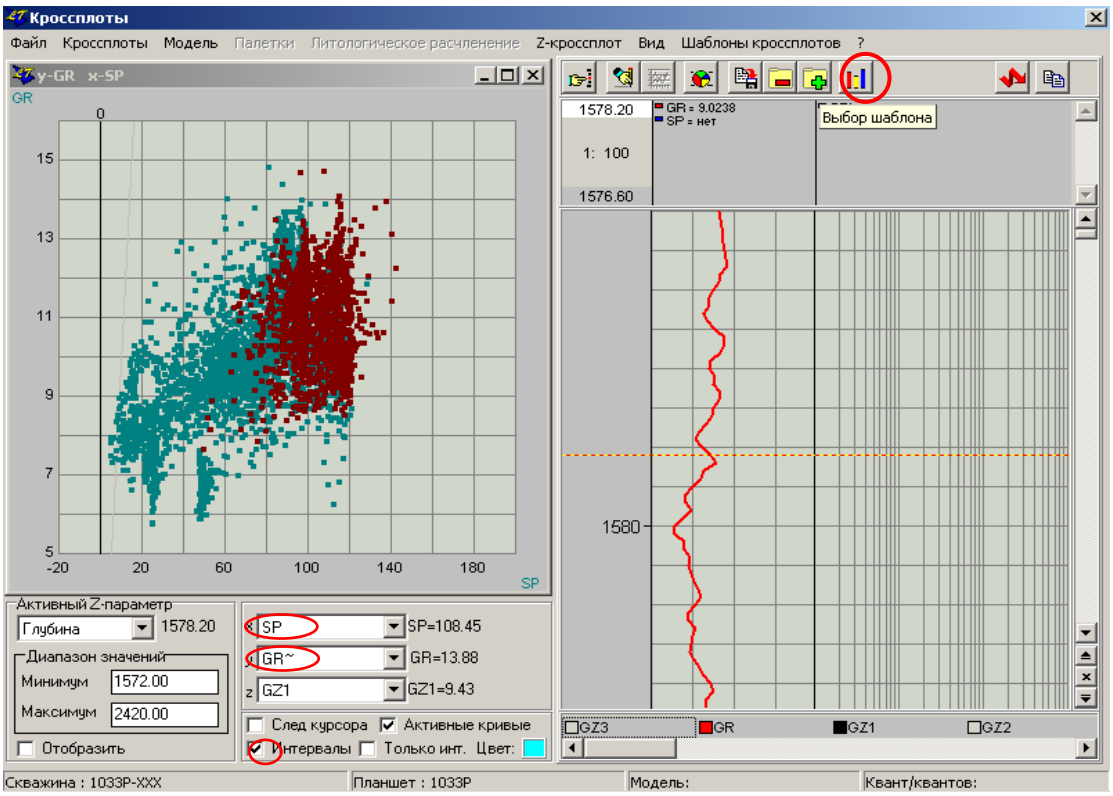
Оценить правильность выбора интервалов песчаников, алевролитов и глин можно по кривым SP(X) и GR(Y).



Плотные породы характеризуются пониженными значениями по DGR и повышенными значениями по DNLT, поэтому проверить их положение можно по кросплоту GR – DNLT.



По этому же кроссплоту выбирают значение $D_{кр}$ – это уровень ниже которого облако точек значений DNLT у известняков переходит в единичные точки.



Правильность выбора интервалов известняка можно по кроссплоту кривых DNLT(нейтронный каротаж) и GR.

Интервалы можно просмотреть только поочередно, одновременно просмотреть интервалы нескольких пород нельзя.

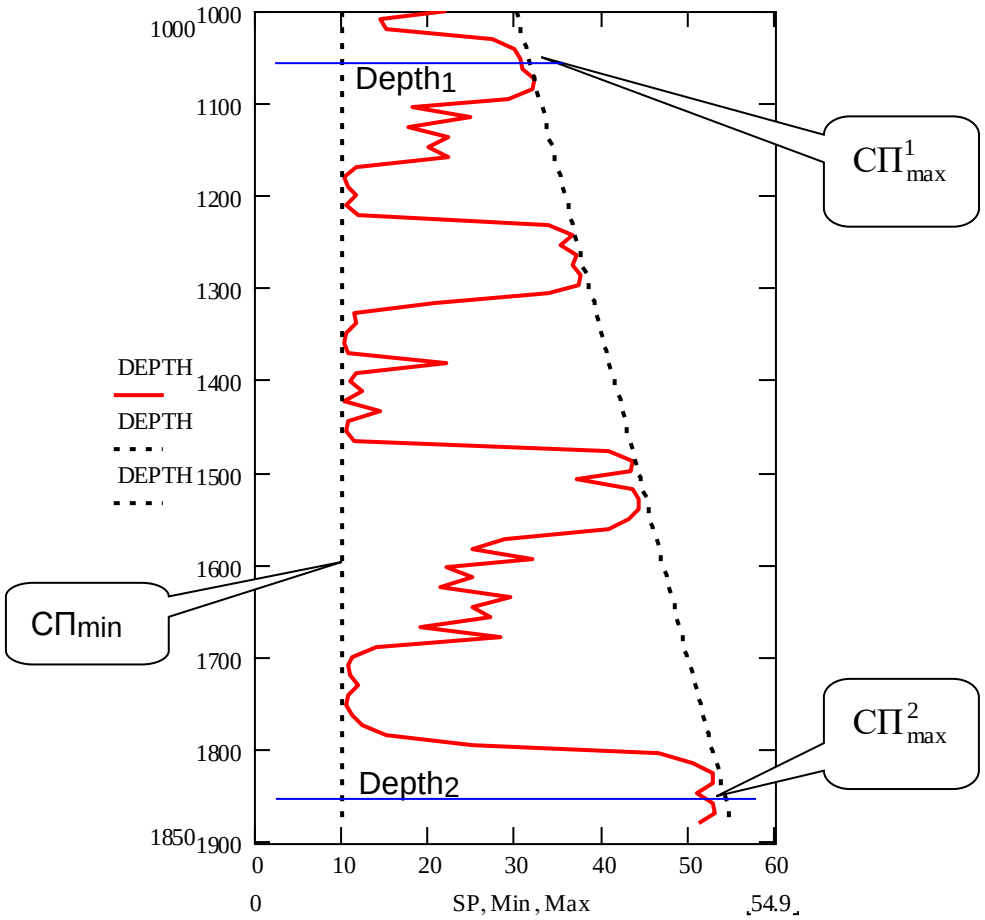
Чтобы вернуться в окно редактирования планшета, выходим из кроссплота с сохранением изменений и нажимаем кнопку  .

5 Расчет коллекторных свойств

5.1. Расчет относительных амплитуд (разностных параметров ASP(α_{SP}), DGR(Δ_{GR}), DNLT(Δ_{NLT}))

Первым этапом интерпретации является определение линии песчаников по СП и ГК (минимальные значения) и определения линии глин по ПС и ГК (максимальные значения).

Если минимальные значения (линия песчаников) по ПС практически не меняется с глубиной, то максимальные значение (линия глин) может значительно увеличиваться.



В простейшем случае это линейная зависимость, в более сложных - квадратичной

Кроме того, величина аномалий зависит от геологических условий и меняется от скважины к скважине.

Поэтому значение ПС на линии глин можно задавать как функцию от глубины. В простейшем виде это линейная функция вида:

$СП_{max}$=A*DEPTH + B;

где A и B –эмпирические коэффициенты, DEPTH – метки глубины.

Коэффициенты A и B можно найти по формулам:

$$A = \frac{СП^1_{max} - СП^2_{max}}{Depth_1 - Depth_2},$$

$$B = СП^1_{max} - A * СП^2_{max}$$

Двойные разностные параметры находятся по формулам:

$$\alpha_{PS} = \frac{U_{SP\max} - U_{SP}текущее}{U_{SP\max} - U_{SP\min}};$$

$$\Delta I_{\gamma}^{ГК} = \frac{I_{\gamma}^{ГК} - I_{\gamma\min}^{ГК}}{I_{\gamma\max}^{ГК} - I_{\gamma\min}^{ГК}};$$

$$\Delta I_{\gamma}^{НК} = \frac{I_{\gamma}^{НК} - I_{\gamma\min}^{НК}}{I_{\gamma\max}^{НК} - I_{\gamma\min}^{НК}}.$$

Расчеты выполняются во встроенном калькуляторе – кнопка  . Программы расчета пишутся на встроенном языке программирования, аналогичном языку программирования в среде "MatCad".

Например, для расчета α_{SP} параметра необходимо записать выражение:

ASP:=(145-SP)/(145-15),

где 145 и 15 – максимальное и минимальное значение кривой SP.

Минимальные и максимальные значения кривых можно просмотреть на вкладке "Статистика" окна свойств кривой (щелкнуть на самой кривой или её названии правой клавишей мышки, выбрать пункт свойства кривой).

Расчет осуществляется после нажатия пункта в меню - "счет". Если в формуле нет ошибок, то на планшете отобразится новая кривая.

Для того чтобы счет проходил по всей скважине необходимо сначала задать неопределенный интервал в окне задания интервалов -  .

Сохранение формулы осуществляется пунктом меню "Запись формулы", открытие формулу пунктом "Ввод формулы".

Рассчитаем следующие коэффициенты:

ASP (α_{SP})

$$\alpha_{PS} = \frac{U_{SP\max} - U_{SP}текущее}{U_{SP\max} - U_{SP\min}};$$

DGR(Δ_{GR})

$$\Delta I_{\gamma}^{ГК} = \frac{I_{\gamma}^{ГК} - I_{\gamma\min}^{ГК}}{I_{\gamma\max}^{ГК} - I_{\gamma\min}^{ГК}};$$

DNLT(Δ_{NLT})

$$\Delta I_{\gamma}^{НК} = \frac{I_{\gamma}^{НК} - I_{\gamma\min}^{НК}}{I_{\gamma\max}^{НК} - I_{\gamma\min}^{НК}}$$

Для того чтобы исключить не корректные значения в результатах расчета (менее 0 или более 1), вставляем в формулу условие:

```
if(ASP>1) then
ASP:=1
endif
if(ASP<0) then
ASP:=0
```

Пример программы расчета разностных параметров.

ASP:=(SP_{max} – SP)/(SP_{max} – SP_{min})
if(ASP>1) then
ASP:=1
endif
if(ASP<0) then
ASP:=0
endif
DGR:=(GR - GR_{min})/(GR_{max} – GR_{min})
if(DGR>1) then
DGR:=1
endif
if(DGR<0) then
DGR:=0
endif
DNLT:=(NLT - NLT_{min})/(NLT_{max} – NLT_{min})
if(DNLT>1) then
DNLT:=1
endif
if(DNLT<0) then
DNLT:=0
endif

После счета формул должно появиться 3 новых кривых – ASP, DGR, DNLT.

Сохраняем формулу в файл (название выбирается произвольно).

5.2. Расчет коллекторских свойств

1.Оценка коэффициента глинистости:

Коэффициент глинистости можно оценить по данным методов ПС и ГК.

Основой оценки коэффициента глинистости $C_{гл}$ по естественному гамма-излучению является использование эмпирической связи между $C_{гл}$ и двойным разностным параметром ΔJ_γ (Δ_{GR}): $C_{гл} = C_{гл\,o}\,\Delta J_\gamma{}^b$, где $C_{гл\,o}$ - глинистость опорного пласта глин (обычно $C_{гл\,o}$ =0,8÷0,9); b - коэффициент, характеризующий нелинейность связи (b=0,6÷1).

Для b=0,8 формула будет иметь вид:

$$K_{ГЛ}^{ГК} = 0{,}9 \cdot DGR^{0.8}$$

.

По данным методов потенциалов собственной поляризации $C_{гл}$=1-$\alpha_{пс}{}^{0,38}$.

$$K_{ГЛ}^{ПС} = 1 - ASP^{0.38}$$

KGP - $K_{ГЛ}^{ПС}$ коэффициент глинистости по ПС, KGG - $K_{ГЛ}^{ГК}$ коэффициент глинистости по ГК.

```
KGP:=1-ASP^0.38
KGG:=0.9*DGR^0.8
```

2.Оценка коэффициент пористости:

Коэффициент пористости можно оценить по данным методов ПС, НК и акустического каротажа.

KPP ($K_{П}^{ПС}$ коэффициент пористости по ПС) и KPN ($K_{П}^{НК}$ коэффициент пористости по нейтронному каротажу).

```
KPP:=0.08+0.15*ASP
KPN:=0.19-0.05*Ln(0.99*DNLT+0.01)+(0.00042*DEPT-
1.1)*KGP
```

Формулу сохраняем.

После счета формулы на рабочем планшете появятся кривые коэффициентов. Кривые коэффициентов пористости и коэффициентов глинистости переносим в разные поля. Масштаб вывода поля KPP, KPN - 0÷0.3, поля KGP, KGG - 0÷1.

6. Построение Литологической колонки

6.1. Расчет литологической колонки

Для автоматической интерпретации используются те же критерии, что и при ручном литологическом расчленение разреза.

Используя кривые двойных разностных параметров - $\alpha_{сп}$, $\Delta I_{ГК}$, $\Delta I_{нкт}$, можно выделить границы пластов.

Коллектора выделяются пониженными значениями по методам ГК и ПС. Следовательно, напротив пластов коллекторов значения $\alpha_{сп}$, $\Delta I_{ГК}$ будут находиться в пределах 0 – 0,3.

Характер флюида определяем по сопротивлению.

Для расчета литологической колонки в калькуляторе открываем новую формулу и заводим программу:

```
;ЛИТОЛОГИЯ
;ГЛИНА
if(ASP<0.3 AND ASP=0.3 AND DNLT<0.3) then
    ГЛ:=1
    ПЕС(Н):=0
    ПЕС(В):=0
    АЛ:=0
```

```
ИЗВ:=0

endif

;Песчаник(нефтеносный)
if(ASP>0.6 AND ASP=0.6 AND DNLT<0.3 AND GZ3>8) then
        ГЛ:=0
        ПЕС(Н):=1
        ПЕС(В):=0
        АЛ:=0
ИЗВ:=0

endif

;Песчаник(водоносный)
if(ASP>0.6 AND ASP=0.6 AND DNLT<0.3 AND GZ3<8) then
        ГЛ:=0
        ПЕС(Н):=0
        ПЕС(В):=1
        АЛ:=0
ИЗВ:=0

endif

;Алевролит
if(ASP>0.3 AND ASP<0.6 AND DNLT<0.3) then
        ГЛ:=0
        ПЕС(Н):=0
        ПЕС(В):=0
        АЛ:=1
ИЗВ:=0

endif

;Известняк
if(DNLT>0.3) then
        ГЛ:=0
        ПЕС(Н):=0
        ПЕС(В):=0
        АЛ:=0
ИЗВ:=1

endif
```

В рабочем планшете добавятся 5 кривых ГЛ, ПЕС(Н), ПЕС(В), АЛ, ИЗВ.

Приносим кривые в новое поле и в параметрах визуализации раскрашиваем следующим образом:

песчаники нефтеносные – красным;

песчаники водоносные – желтым;

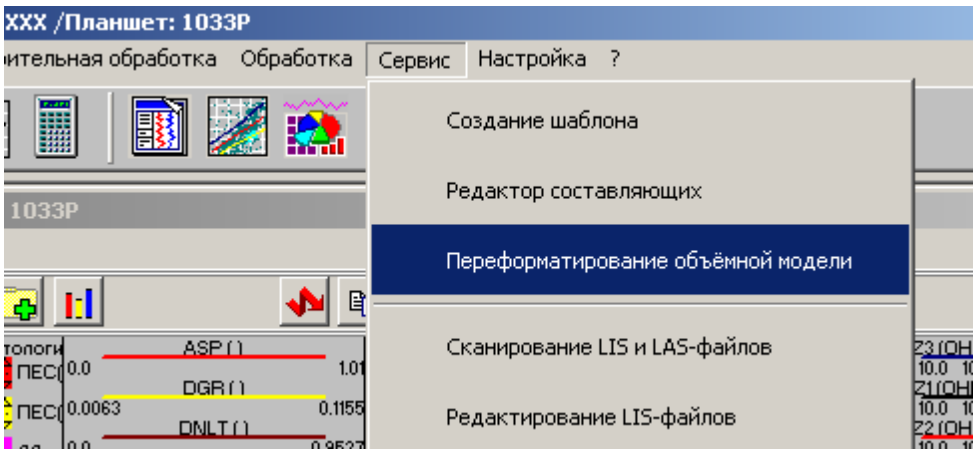
алевролиты – зеленым;

глины – коричневым;

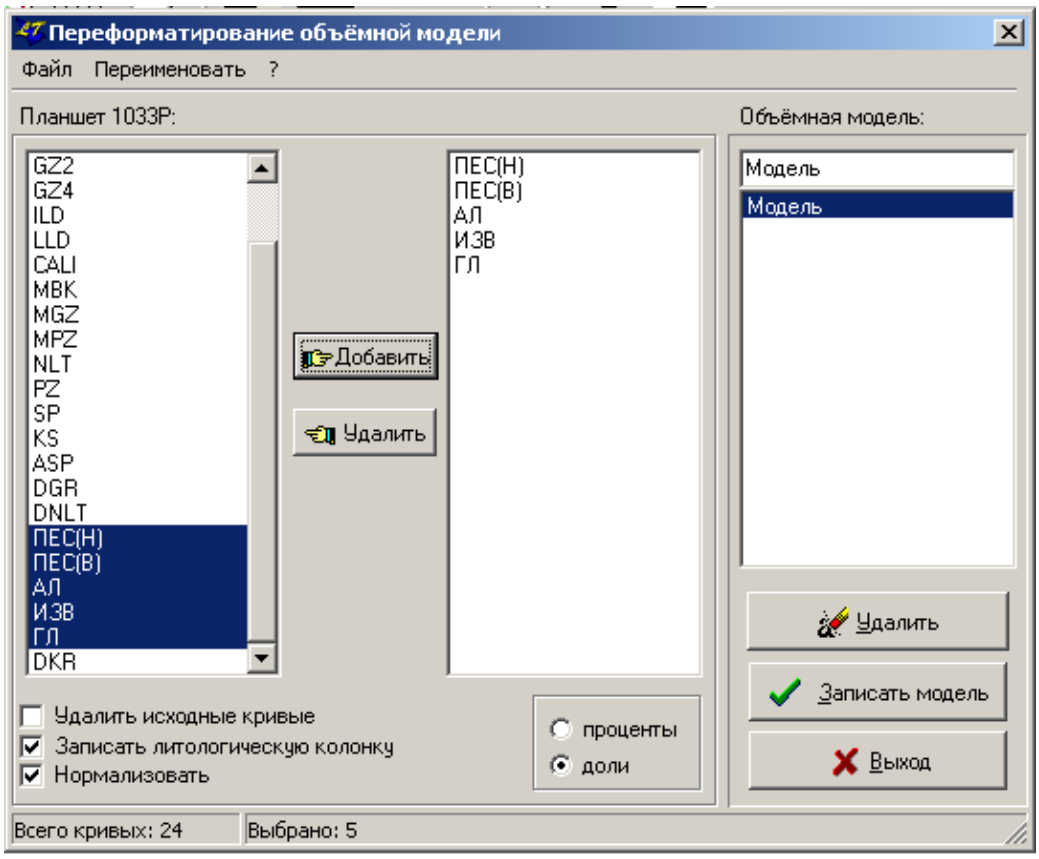
известняки – синим.

6.2. Построение литологической колонки

После расчета литологии можно приступать к построению литологической колонки. В меню сервис выбираем пункт "Переформатирование объемной модели".

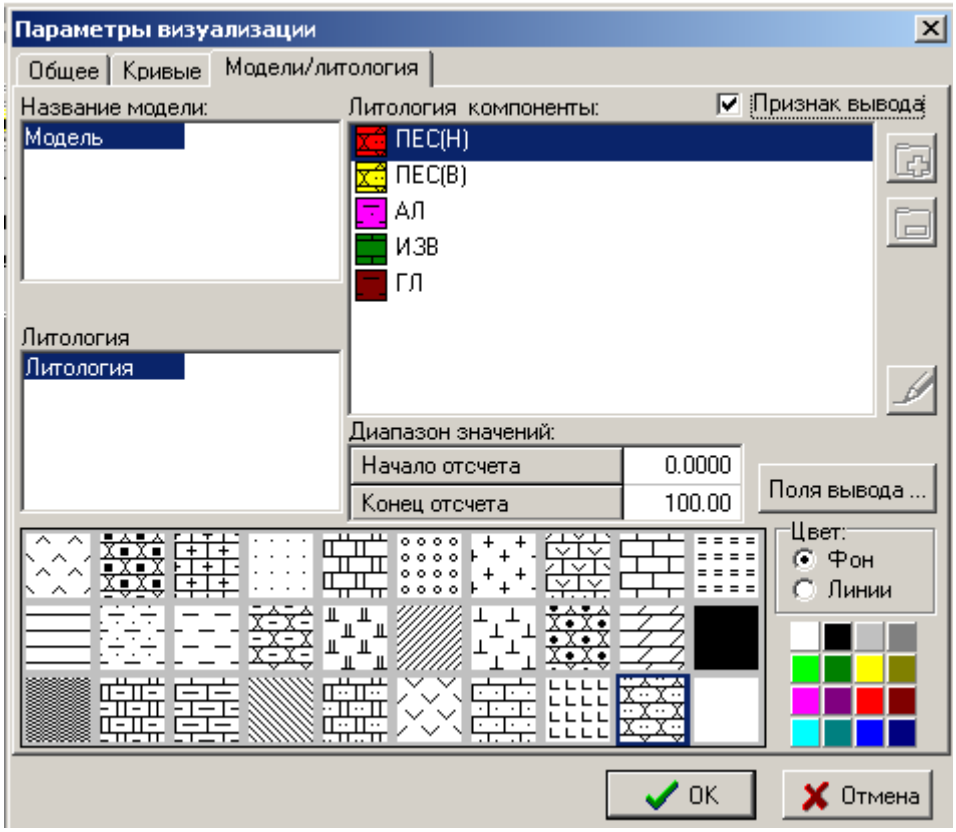


Открывается окно "Переформатирование объемной модели". Выбираем засчитанные по программе "литология" кривые (ГЛ, ПЕС(Н), ПЕС(В), АЛ, ИЗВ) и нажимаем кнопку – "Добавить". Отмечаем галочками поля "Записать литологическую колонку" и "Нормализовать". Отмечаем формат вывода – "Доли". Задаем название модели – Литология. После этого нажимаем кнопку – "Записать модель".



Закрываем окно и переходим в окно редактирования рабочего планшета.

В параметрах визуализации кривых рабочего планшета появляется новая вкладка

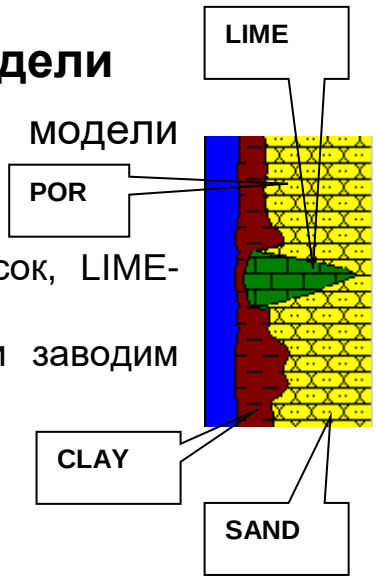


Отмечаем галочку - "Признак вывода" для модели и для литологии.

Для литологии выбираем рисунок и цвет для пород разреза (см. рисунок).

Закрываем окно. На рабочем планшете появится 2 новых поля: литология и модель. Поле "модель" удаляем, щелкнув по нему правой кнопкой мышки выбрав пункт – "Удалить объект". Поле "Литология" переносим к полю с кривыми ГЛ, ПЕС(Н), ПЕС(В), АЛ, ИЗВ и настраиваем его ширину.

7. Построение объемной модели



Для построения объемной модели рассчитываем баланс:

POR + CLAY + SAND + LIME = 1

где POR-пористость, CLAY-глина, SAND - песок, LIME-известняк.

В калькуляторе открываем новую формулу и заводим программу:

```
;Пористость (POR)
if(DNLT>DKR) then
        POR:=KPN
else
        POR:=(KPN+KPP)/2
```

```
endif

;Глина (CLAY)
if(DNLT<DKR) then
        CLAY:=KGP*(1-POR)
else
        CLAY:=KGG*(1-POR)
endif

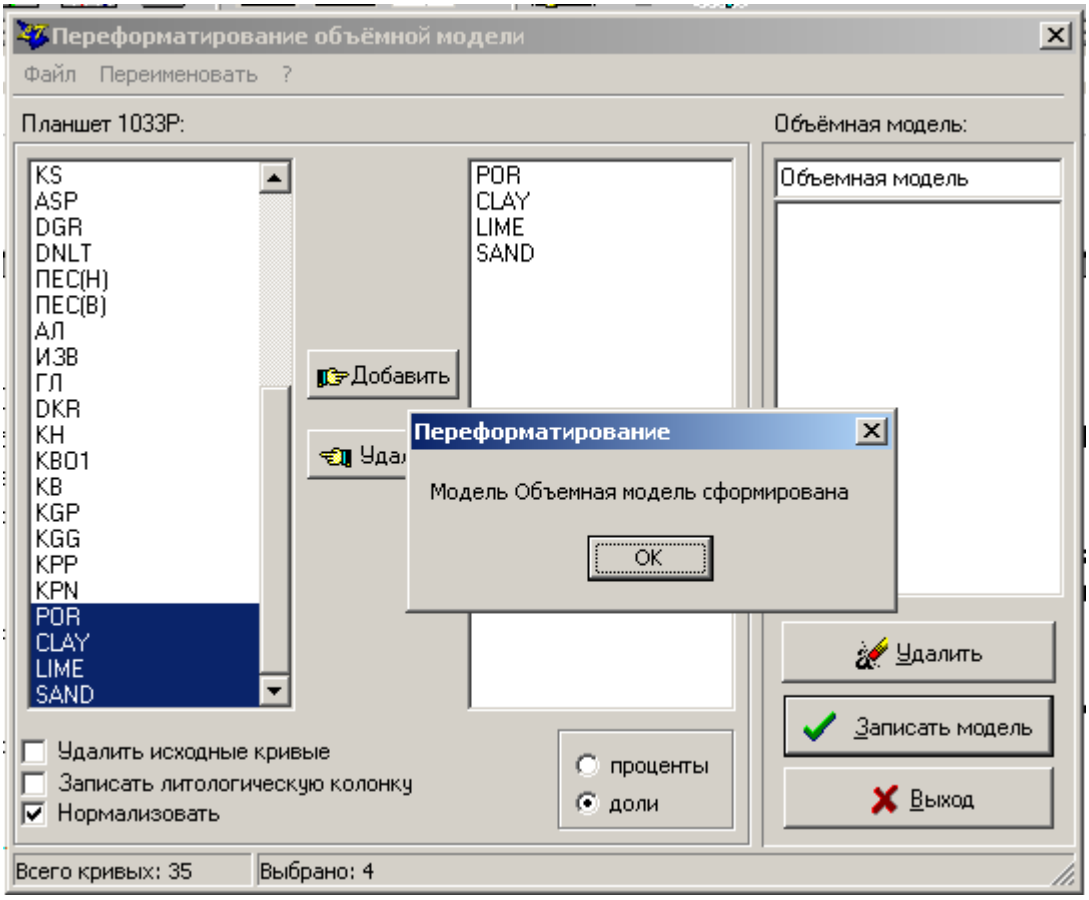
;Известняк (LIME)
if(DNLT<DKR) then
        LIME:=0
else
        LIME:=((DNLT-DKR)/(1-DKR))*(1-POR)*(1-CLAY)
endif

;Песок (SAND)
        SAND:=1-POR-CLAY-LIME
if(SAND<0) then
        SAND:=0
Endif
```

Полученные, после расчета программы кривые переносим в новое поле, настраиваем цвета и масштаб вывода.

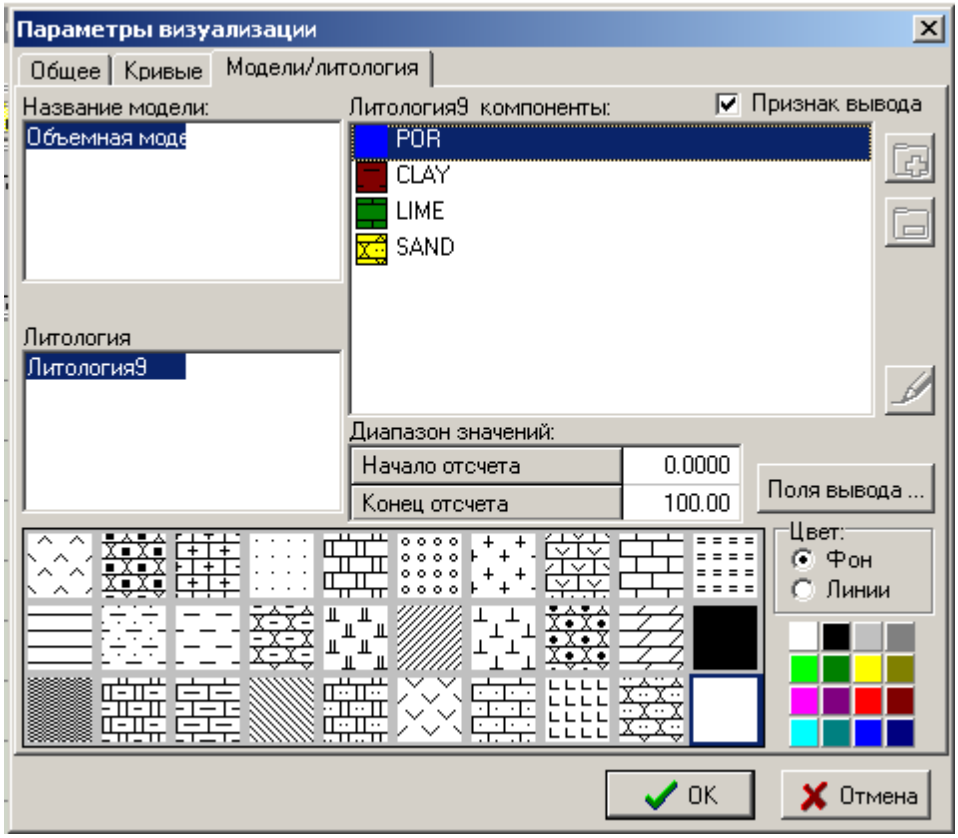
Приступаем к построению объемной модели. В меню сервис выбираем пункт "Переформатирование объемной модели".

Открывается окно "Переформатирование объемной модели". Выбираем засчитанные по программе "Объемная модель" кривые (POR, CLAY, SAND, LIME) и нажимаем кнопку – "Добавить". Отмечаем галочкой поле "Нормализовать". Отмечаем формат вывода – "Доли". Задаем название модели (объемная модель) и нажимаем кнопку – "Записать модель".



Закрываем окно и переходим в окно редактирования рабочего планшета.

Во вкладке "модели/литология" параметров отмечаем галочку - "Признак вывода" для модели.

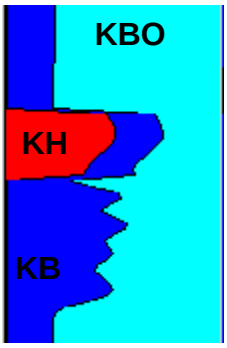


Выбираем цвет и штриховку для модели.

Закрываем окно. На рабочем планшете появится поле - объемная модель.

Настраиваем ширину полей и параметры визуализации кривых.

8. Построение флюидной модели



Для построения флюидной модели составляем баланс:

$К_Н+К_В+К_{ВО}=1$;

где $К_Н$ – коэффициент нефтенасыщенности;

$К_В$ – коэффициент водонасыщенности;

$К_{ВО}$ – коэффициент остаточной водонасыщенности.

В калькуляторе открываем новую формулу и заводим программу:

```
;ФЛЮИДНАЯ МОДЕЛЬ
DKR:=0.3
;KN
if(ASP>0.6 AND DNLT<DKR AND GZ3>8) then
KN:=0.156*lg(GZ3/2.3)+0.048
Else
KN:=0
Endif

;KBO
KBO1:=1-2*ASP+1.27*ASP^2
KBO2:=10^(-0.64*lg(GZ3/2.3))

;KB
KB:=1-KN-KBO1
```

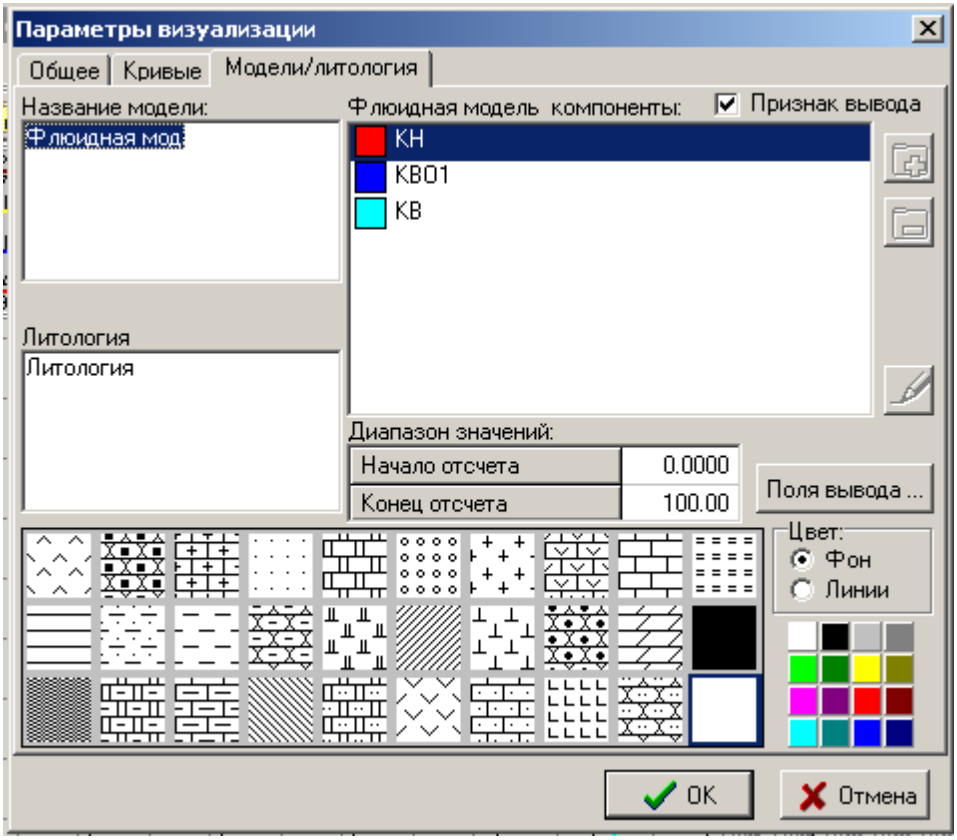
Полученные, после расчета программы кривые переносим в новое поле, настраиваем цвета и масштаб вывода.

Приступаем к построению флюидной модели. В меню сервис выбираем пункт "Переформатирование объемной модели".

Открывается окно "Переформатирование объемной модели". Выбираем засчитанные по программе "Флюидная модель" кривые (KN, KBO1, KBO2, KB) и нажимаем кнопку – "Добавить". Отмечаем галочкой поле "Нормализовать". Отмечаем формат вывода – "Доли". Задаем название модели (флюидная модель) и нажимаем кнопку – "Записать модель".

Закрываем окно и переходим в окно редактирования рабочего планшета.

Во вкладке "модели/литология" параметров отмечаем галочку - "Признак вывода" для модели.



Для флюидной модели выбираем цвет и убираем штриховку.

Закрываем окно. На рабочем планшете появится 2 новых поля: литология и флюидная модель. Новое поле литология удаляем. Настраиваем ширину полей и параметры визуализации кривых.

9. Оформление результатов работы

Отчет по работе приводятся в виде таблицы

Вначале отчета приводится краткое описание геологического строения местности, в районе исследуемой скважины.

Результаты интерпретации геофизических данных по скважине заносятся в таблицу:

Результаты оперативной интерпретации данных ГИС на ..... месторождении

п/п	Z кровли	Z подошвы	H, м мощность	пс	п	пс		н	Характер насыщения

В таблицу вносятся выделенные пласты коллекторов, мощностью более 2 метров.

Графа "характер насыщения" – характеризует насыщение коллектора: вода, вода + нефть.

IL MSIM Induction Well Logging индукционный каротаж
LLD OMM Lateral Well Logging боковой каротаж
SP MV Spontaneous Potential метод спонтанной поляризации
KS OMM Potential zonde потенциал зонд
KS1-4 OMM Gradient zonde градиент зонд
OKS OMM Gradient zoned обращенный градиент зонд
GR MR/H Gamma Ray гамма каротаж
NKT UE Neutron Well Logging нейтронный гаротаж
ILD .Ohmm Induction log Deep zoned кажущееся удельное сопротивление по индукционному зонду
ILR Ohmm Induction log Reactive zoned
NTL r.u Neutron log by heat neutron (NTL)
NGL r.u Neutron gamma log
CALI m Borehole size Диаметр скважины

Logging зондирование, каротаж

Содержание

2. Цели и задачи лабораторной работы.....2
5. Предварительная обработка.....3
Функциональные клавиши.....4
Визуализация данных.....5
Просмотр кривых на экране.....5
Вспомогательный трек.....5
Изменение вертикального масштаба.....6
Изменение горизонтального масштаба кривых.....6
Изменение толщины кривых.....6
Изменение цвета кривых.....6
Изменение имен кривых.....7
Перемещение кривых.....7
Установка границ.....7
Выделение интервалов.....7
Коррекция кривых.....8
Видимость кривых.....8
Выбор кривых.....8
Центрирование кривых.....9
Увязка кривых.....9
Сшивка кривых.....9
Удаление кривых.....10
Удаление фрагмента.....10
Просмотр значений кривых.....11
Инвертирование кривых.....11
Реверсирование кривых.....11
Логарифмирование кривых.....11
Потенцирование кривых.....12
Нормирование кривых.....12
Примечание: Если нужно нормировать кривую по модулю отличному от 1, то нужно использовать функцию Нормированная кривая в диалоге Преобразования кривых.....12
Кривая средних значений.....13
Дублирование кривых.....13
Копирование фрагмента кривой.....13
Вставка фрагмента кривой.....13

Удаление выбросов 14
Устранение разрывов 14
Закраска областей кривых 14
Калькулятор данных 15
Преобразования кривых 16
Точечная кривая 19
Статистика кривых 20
Расчет уравнения регрессии 20
Редактирование данных 21
Заголовок файла 21
Единицы измерения кривых 21
Карта данных 22
Кросс - графика 22
Редактирование файлов 22
Ввод и редактирование палеток 23
Алгебраический калькулятор 24
6. . Импорт Las файлов 24
7. 3. Подготовка рабочего Планшета 31
8. 4. Предварительная интерпретация 36
4.1. Выделение интервалов пород 36
Коллектора (песчаники) 38
Глины 39
Алевролиты 41
Плотные породы 41
4.2. Контроль правильности выделения интервалов 44
4.3. Оценка статистических свойств 44
9. 5 Расчет коллекторных свойств 46
5.1. Расчет относительных амплитуд (разностных параметров ASP(α_{SP}), DGR(Δ_{GR}), DNLT(Δ_{NLT})) 46
5.2. Расчет коллекторских свойств 49
10. 6. Построение Литологической колонки 50
6.1. Расчет литологической колонки 50
6.2. Построение литологической колонки 52
11. 7. Построение объемной модели 54
12. 8. Построение флюидной модели 58
13. 9. Оформление результатов работы 59
Содержание 61

Учебное издание

Земцов Н.С., Белышев Ю.В., Болотнова Л.А

«АЛГОРИТМЫ И СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ»
МЕТоДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ПРОВЕДЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Учебно-методическое пособие
к лаботаторным работам по дисциплине
"Алгоритмы и системы обработки и интерпретации"
для студентов специальности 130202 – "Геофизические методы исследования скважин"
направления 130200 – "Технологии геологической разведки"

Корректура кафедры геофизики
Компьютерная верстка автора

Подписано в печать 14.02 2011 г.
Бумага писчая. Формат 60 x 84 1/16.
Гарнитура Times New Roman. Печать на ризографе.
Печ. л. 2,0. Уч.-изд. л. 1,86. Тираж 50. Заказ 19

Издательство УГГУ
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30
Уральский государственный горный университет

Отпечатано с оригинал-макета
в лаборатории множительной техники УГГУ

МИНОБРНАУКИ РФ
ФГБОУ ВО

«Уральский государственный
горный университет»

И. Г. Сковородников

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ В ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЕ

Екатеринбург
2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие…….5
1. Назначение первичных преобразователей, их характеристики и классификация…….5
Контрольные вопросы……...11
2. Преобразователи параметрического типа……...12
2.1. Резистивные преобразователи……...12
2.1.1. Контактные преобразователи……12
2.1.2. Реостатные преобразователи……..13
2.1.3. Тензометрические преобразователи……...16
2.1.4. Электролитические преобразователи……19
2.1.5. Терморезистивные преобразователи……21
2.1.6. Магниторезистивные преобразователи……23
2.1.7. Фотоэлектрические преобразователи……25
2.2. Индуктивные преобразователи……26
2.2.1. Индуктивные преобразователи с изменяемым воздушным зазором…….27
2.2.2. Магнитоупругие преобразователи……29
2.2.3. Магнитомодуляционные преобразователи……...30
2.3. Емкостные преобразователи……..34
Контрольные вопросы……..35
3. Преобразователи генераторного типа …...……36
3.1. Преобразователи индукционной э.д.с……..36
3.1.1. Преобразователи индукционной э.д.с. со взаимным перемещением магнита и катушки индуктивности……..36
3.1.2. Преобразователи индукционной э.д.с. со стационарным размещением магнита и катушки индуктивности……..38
3.2. Преобразователи гальваномагнитной э.д.с……..41
3.2.1. Преобразователи Холла……..41
3.2.2. Преобразователи Виганда……...42

3.3. Преобразователи пьезоэ.д.с……...44
3.4. Преобразователи термоэ.д.с……..45
3.5. Преобразователи фотоэ.д.с……46
Контрольные вопросы……...49
4. Радиационные преобразователи……...49
4.1. Газоразрядные детекторы……..50
4.2. Сцинтилляционные детекторы……..53
4.3. Полупроводниковые детекторы……56
Контрольные вопросы……...56
Литература……..57

ПРЕДИСЛОВИЕ

Цель данного пособия – познакомить студентов с применением различных электрических датчиков в геофизической аппаратуре, облегчить им усвоение соответствующих разделов курса «Геофизическая аппаратура» и выполнение курсового проектирования по нему.

Необходимость издания пособия обусловлена тем, что в опубликованных работах по первичным преобразователям рассматриваются датчики общетехнического применения, в то время, как датчики разнообразной геофизической аппаратуры имеют ряд особенностей, связанных со спецификой условий их эксплуатации.

В пособии рассмотрены физические основы и устройство датчиков всех типов, входные и выходные параметры, указаны их достоинства и недостатки и приведены примеры применения в конкретной геофизической аппаратуре.

В качестве примеров в ряде случаев использованы оригинальные разработки автора.

В конце каждой главы приведен перечень контрольных вопросов для самостоятельной проверки усвоения материала студентами.

1. НАЗНАЧЕНИЕ ПЕРВИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ, ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ И КЛАССИФИКАЦИЯ

Первичные преобразователи в геофизической аппаратуре (ГА) являются теми элементами, которые вырабатывают сигнал информации об измеряемой величине. По этой причине первичные преобразователи ГА называются также измерительными преобразователями. Другими синонимами термина «первичный преобразователь» являются «датчик», «детектор», «чувствительный элемент», «сенсор», «трансмиттер» [4,15,23]. Правда, в специальной литературе существуют различные толкования термина «датчик», наиболее распространенного из перечисленных терминов. Так, например, в монографии К. Бриндли [4], датчик рассматривается как пассивный преобразователь, т.е. преобразователь получающий энергию для своей работы от измеряемой величины. В других источниках [1,16] под датчиком понимается конструктивно законченное устройство, которое, кроме первичного преобразователя, может содержать и другие элементы (усилитель сигнала, источник питания и т.п.) и которое устанавливается на удалении от наблюдателя. В данном пособии, как и в большей части специальной литературы, термин «датчик» будет использоваться как синоним первичного или измерительного преобразователя.

Важнейшими характеристиками датчиков служат: чувствительность, точность (достоверность) информации об измеряемой величине, надежность и долговечность, стабильность работы при изменении внешних условий, быстродействие, вид зависимости выходного сигнала от измеряемой величины (линейная, нелинейная, реверсивная, нереверсивная и т.п.).

Поясним некоторые из перечисленных характеристик.

Чувствительность преобразователя, которую также называют **коэффициентом передачи**, представляет собой отношение изменения

выходного сигнала *y,* к изменению входного сигнала *x.* Различают три вида коэффициентов передачи: статический, относительный и дифференциальный.

Статический коэффициент передачи используется для определения свойств преобразователей с линейной характеристикой: $K_{ст}=y/x$.

Дифференциальный коэффициент передачи применяется для датчиков с нелинейной характеристикой: $K_{диф}=\lim\Delta y/\Delta x \approx dy/dx$. Значение этого коэффициента непостоянно и зависит от величины входного сигнала *x*.

Относительный коэффициент передачи равен отношению относительного изменения сигнала на выходе датчика к относительному изменению сигнала на его вход $K_{отн}=(\Delta y/y)/(\Delta x/\Delta x)$. Этот коэффициент является величиной безразмерной и удобен для сравнения свойств преобразователей, различных по принципу действия и конструкции.

У некоторых измерительных преобразователей вследствие трения покоя, шумов измерительной схемы, гистерезиса и др. причин изменение выходного сигнала появляется только тогда, когда измеряемая величина достигает определенного уровня. Этот уровень называется порогом **чувствительности** $x_п$.

Во время работы первичного преобразователя на него, кроме измеряемой величины, воздействуют и другие сигналы – помехи, например, изменения температуры, внешнего давления, вибрации, изменения напряжения питания и пр. Результаты воздействия помех проявляются в виде погрешностей измерений: абсолютных, относительных, приведенных.

Абсолютная погрешность – это разность между измеренным *y* и действительным (расчетным) значениями выходной величины y_0: $\Delta y=y_{изм}-y_0$.

Относительная погрешность – это отношение абсолютной погрешности к действительному значению выходной величины в процентах: $\delta=(\Delta y/y_0)\cdot 100$.

Приведённая погрешность – это отношение абсолютной погрешности к наибольшему действительному значению выходной величины: $\varepsilon=\Delta y/y_{max}$. Для измерительных приборов приведенная погрешность определяет их класс точности.

В зависимости от режима, для которого определяется абсолютная или относительная погрешность, различаются **статические** и **динамические** погрешности (ошибки). Приведенная погрешность определяется только для установившегося (статического) режима [10].

Характер зависимости выходного сигнала от измеряемой величины $y=f(x)$ в установившемся режиме называется **статической** характеристикой преобразователя.

Наиболее удобными в работе и потому наиболее распространенными являются датчики, имеющие линейную характеристику. Если характеристика датчика нелинейна, то для формирования выходного сигнала могут применяться системы линеаризации. В некоторых случаях, например, если измеряемая величина изменяется нелинейным образом, удобнее использовать преобразователи с нелинейной статической характеристикой.

В зависимости от того, как на выходную величину влияет изменение знака измеряемой величины, статические характеристики бывают: **нереверсивными** (когда знак выходного сигнала остается постоянным во всем диапазоне измерений) и **реверсивными** (когда выходной сигнал изменяет свой знак вслед за измерявшейся величиной).

Следует упомянуть еще одну из характеристик измерительных преобразователей – **гистерезис**, который проявляется в несовпадении значений выходного сигнала при одном и том же значении измеряемой величины в зависимости от уменьшения или увеличения последней в момент измерения.

Надежность преобразователя – это способность работать в течение определенного периода времени при заданных условиях эксплуатации.

Надежность преобразователей, так же, как надежность, сложных электронных или механических устройств вообще, характеризуется вероятностью безотказной работы, средним временем безотказной работы и интенсивностью отказов – отношением числа отказавших устройств в определяемый промежуток времени к числу работоспособных в начале этого промежутка.

График зависимости интенсивности отказов от времени эксплуатации имеет характерную корытообразную форму. Первый участок графика (0 – t_1) называется "временем приработки", в этот период интенсивность отказов велика из-за того, что здесь проявляются дефекты сборки, выходят из строя некондиционные детали и т. п. Второй участок $t_1 – t_2$ называется "периодом условной долговечности», здесь отказы могут быть связаны, в основном, со случайными причинами. Третий участок $t_2 – \infty$ называется "периодом старе-

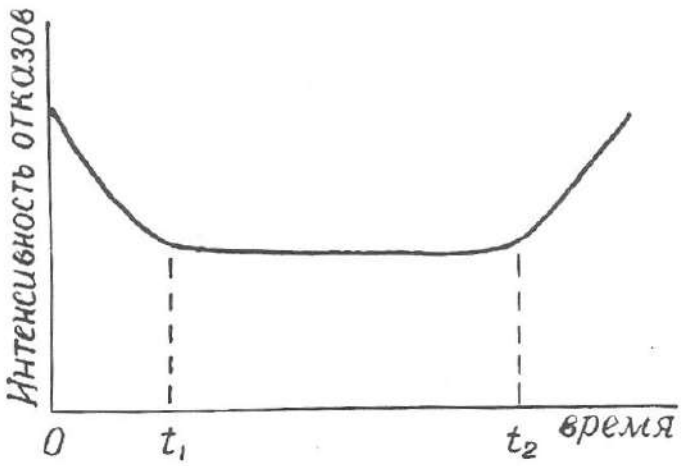


Рис. 1.1. Зависимость и интенсивности отказов от времени эксплуатации преобразователя

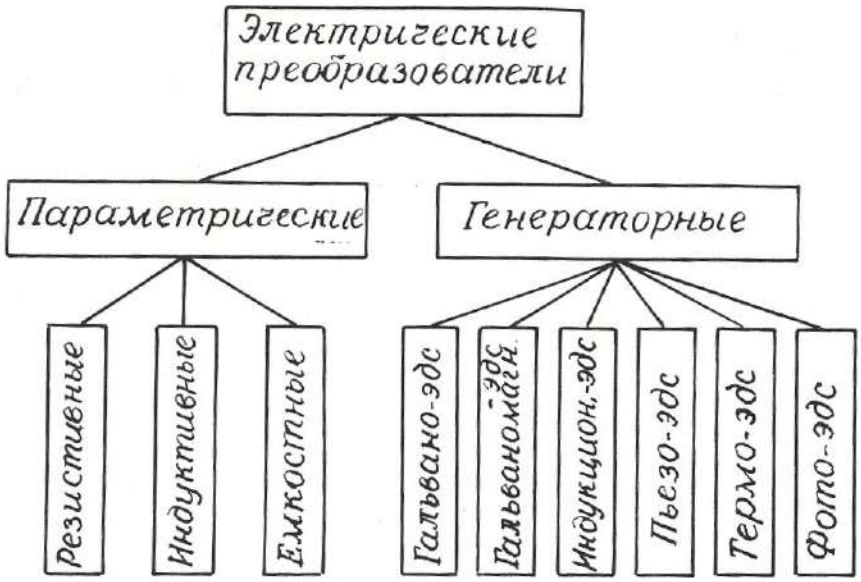


Рис. 1.2. Классификация электрических преобразователей

ния», здесь интенсивность отказов растет из-за того, что детали преобразователя вырабатывают свой ресурс (рис. 1.1).

Пути повышения надежности преобразователей – это упрощение их устройства, использование элементов с большой вероятностью безотказной работы, «разгруженный» режим эксплуатации.

Подавляющее большинство датчиков геофизической аппаратуры преобразуют измеряемую величину в электрический сигнал, хотя имеются датчики, например, в гравиразведочных приборах, выходная величина которых не является электрической.

Электрические преобразователи, применяемые в геофизической аппаратуре, крайне разнообразны по принципу действия и конструкции.

Основными признаками, позволяющими классифицировать датчики, являются: назначение, принцип действия, вид входного и выходного сигналов, наличие или отсутствие источников питания.

По назначение электрические датчики делятся на преобразователи неэлектрических величин в электрические и преобразователи одних электри-

ческих величин в другие. Соответственно входные величины измерительных преобразователей могут иметь как электрическую, так и неэлектрическую природу. Это могут быть характеристики различных физических полей (например, магнитная индукция, температура, сила тяжести, э.д.с. естественных электрических полей), разнообразные свойства горных пород, руд и растворов (плотность, электрическое сопротивление, магнитная восприимчивость, радиоактивность), геометрические и технические параметры буровых скважин (их диаметр, углы искривления), скорость перемещения, механические усилия и т. д.

Выходными величинами электрических датчиков могут, быть: э.д.с., сила тока, частота тока, импульсы тока или комбинации импульсов различной длительности и амплитуды, а также сопротивление, емкость или индуктивность электрической цепи.

По принципу действия электрические преобразователи делятся на **параметрические**, изменяющие пассивные элементы электрической цепи (сопротивление, емкость, индуктивность), и **генераторные**, вырабатывающие э.д.с. различной физической природы. В свою очередь, среди параметрических датчиков выделяются: резистивные, емкостные и индуктивные, а среди генераторных: датчики гальванической, гальваномагнитной, индукционной, фото-, пьезо- и термоэ.д.с. (рис. 1.2).

Особняком стоят радиационные преобразователи (детекторы радиоактивных излучений), которые имеет сложную структуру.

Каждый из видов датчиков, изображенных на рис. 1.1, имеет свои разновидности, отличающиеся по конструктивному исполнению.

По наличию или отсутствию специальных источников питания датчики подразделяются на **пассивные**, получающие энергию от измеряемой величины, и активные, питающиеся от внешнего источника.

В следующих разделах пособия будут рассмотрены физические свойства, особенности конструкции, достоинства и недостатки, а также примеры

применения в конкретных образцах геофизической аппаратуры всех видов датчиков, представленных на рис. 1.2.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение измерительного преобразователя.
2. Какие синонимы существуют у термина «измерительный преобразователь»?
3. Что такое чувствительность преобразователя?
4. Назовите виды коэффициентов передачи датчика.
5. Назовите виды погрешностей преобразователей, укажите, какие причины их вызывают.
6. Что такое статическая характеристика преобразователя?
7. Что такое надежность преобразователя?
8. Поясните график зависимости интенсивности отказов от времени (рис. 1.1).
9. По каким признакам производят классификацию электрических преобразователей?
10. Назовите входные и выходные величины электрических преобразователей в геофизической аппаратуре.
11. На какие две большие группы делятся электрические преобразователи по принципу действия?
12. Поясните классификацию преобразователей, приведенную на рис. 1.2.

2. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ТИПА

2.1. Резистивные преобразователи

В преобразователях этого вида изменения измеряемого параметра преобразуются в изменения **активного сопротивления** электрической цепи.

В соответствии с выражением $R=\rho \cdot l/S$ (2.1) изменения сопротивления R могут происходить за счет изменения геометрических размеров проводника (длины l и поперечного сечения S) или его удельного сопротивления ρ. К

преобразователям с изменяемыми размерами относятся контактные, реостатные, потенциометрические, тензометрические, угольные и электролитические датчики. К преобразователям с изменяемым удельным сопротивлением – электролитические, терморезистивные и некоторые фотоэлектрические датчики.

2.1.1. Контактные преобразователи

Контактные преобразователи представляют собой простейшую разновидность преобразователей резистивного типа. В одном крайнем положении их сопротивление равно бесконечности, в другом близко к нулю. Работой контактных преобразователей могут управлять механические (линейное или угловое перемещение) или различные физические параметры (температура, магнитное поле, электрический ток).

Контактные преобразователи составляют основу большинства реле, широко применяемых в системах автоматического управления [8,11]. В последнее время широкое распространение получили **герконы** – миниатюрные герметизированные контактные преобразователи, управляемые магнитным полем.

Достоинства контактных преобразователей составляют их простата и малая стоимость, универсальность (они могут работать в цепях как постоянного, так и переменного тока); недостатки – искрение и «дребезг» контактов, возможность ложных срабатываний контактов от тряски.

В геофизической аппаратуре контактные преобразователи используются в различных измерителях постоянных напряжений для преобразования этих напряжений в переменные, которые потом подвергаются усилению на электронных усилителях. Примером могут служить электроразведочные измерители ЭСК-1, АТ-72, самопишущие каротажные потенциометры ПАСК-8 и ПАСК-9. Контактные преобразователи используются также в схемах

управления многочисленных скважинных приборов (в пластовом наклономере НП-3, расходомерах с раскрывающимся пакером и др.).

Герконы используются в скважинных расходомерах РСМ, РГД, ДГД и др. [21].

2.1.2. Реостатные преобразователи

Простейший реостатный преобразователь – это переменный резистор, подвижный контакт которого перемещается вследствие изменения измеряемой величины – линейного перемещения, давления, угла наклона, направления магнитного поля и т.п.

Реостатный преобразователь (рис. 2.1, а) может быть включен по потенцио-метрической схеме (рис. 2.1, б), в этом случае он должен быть отнесен к преобразователям генераторного типа.

Как правило, реостатные преобразователи выполняют в виде намотки из изолированной проволоки высокого сопротивления (из манганина, константана, вольфрама) на каркасе из изоляционного материала. Форма каркаса может быть различной: прямоугольной, кольцевой или более сложной конфигурации в зависимости от входного параметра и необходимой зависимости $R= f(x)$.

Проволочные реостатные преобразователи являются дискретными, т.к. непрерывному изменению входной величины x соответствует скачкообразное изменение сопротивления R определяемое переходом подвижного контакта с одного витка провода на другой. Это обуславливает и погрешность измерений, которая уменьшается с уменьшением диаметра проволоки и увеличением числа витков W. Статический коэффициент передачи реостатного датчика $K_{ст}=z\cdot W/l$, где z – сопротивление одного витка, l – длина намотки.

Обычная относительная погрешность датчиков $\delta= 0{,}2 – 0{,}5$ %.

Преимущества реостатных датчиков: простота конструкции, малый вес и габариты, возможность включения в цепь как постоянного, так и переменного тока, возможность получения необходимой статической характеристики

R=f(x), недостатки: наличие подвижного механического контакта, что уменьшает надежность датчика, необходимость какого-то усилия для перемещения этого контакта, влияние температуры.

Благодаря своей простоте и универсальности реостатные преобразователи широко используются в геофизической аппаратуре для исследования скважин: в каверномерах (КФ, КМ, СКП-1 и др.), в инклинометрах (ИК-1, ИК-2, МИР-36, ИГ-36 и др.) [2,9,12], в датчиках натяжения кабеля, в некоторых уровнемерах. Так, например, в скважинном уровнемере конструкции УГИ [18,26], изменение уровня жидкости над прибором, точнее, гидростатическое давление столба жидкости над ним преобразуется в изменение уровня токопроводящей жидкос-

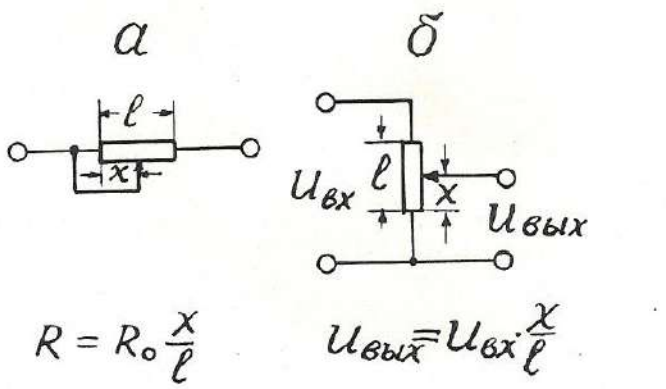


Рис. 2.1. Реостатный преобразователь (а) и его включение по потенциометрической схеме (б).

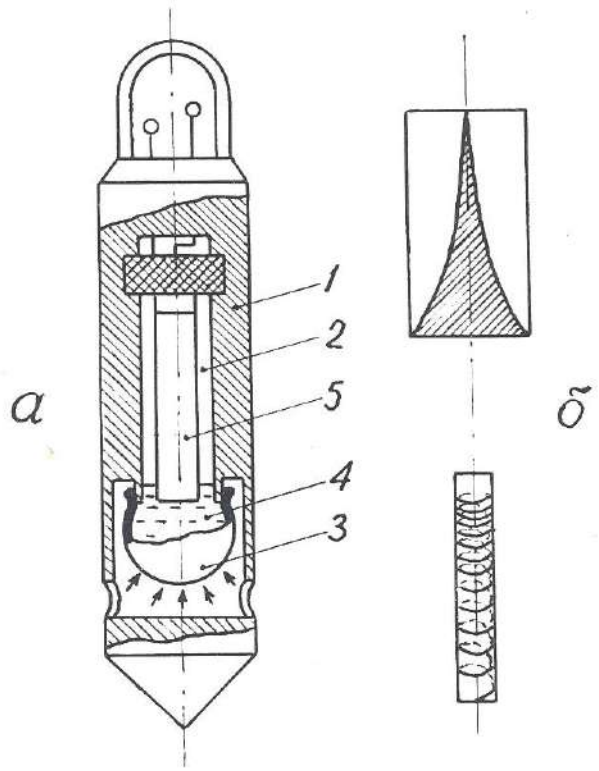


Рис. 1.2. Пример применения реостатного преобразователя в скважинном уровнемере с линейной входной характеристикой: а – конструкция уровнемера; б – варианты выполнения реостата; 1 – корпус уровнемера; 2 – измерительная камера; 3 – гибкий резервуар; 4 – токопроводящая жидкость; 5 – реостат.

ти в измерительной камере, отделенной от внешней среды гибкой оболочкой (рис. 2.2). Вдоль продольной оси камеры располагается реостатный преобразователь, подвижным контактом которого служит токопроводящая жидкость. Поскольку давление P в измерительной камере и ее объем V при постоянной температуре связаны соотношением PV=const [7], то одинаковые приращения давления P .(уровня жидкости) вызывают неодинаковые перемещения уровня токопроводящей жидкости в измерительной камере. Для получения линейной статической характеристики реостатный преобразователь в данном уровнемере выполнен в виде неравномерной намотки или высокоомной пленки переменной ширины таким образом, чтобы приращение сопротивления реостата было обратно пропорционально квадрату перемещения подвижного контакта, т.е. уровня токопроводящей жидкости.

2.1.3. Тензометрические преобразователи

Действие тензопреобразователей основано на изменении сопротивления проводников и полупроводников при их растяжении или сжатии [15].

Тензоэлементы (или тензорезисторы) состоят из тонкой проволоки или фольги, сложенной несколько раз в форме меандра и вклеенной между эластичными бумажными, пленочными или фетровыми подкладками. Толщина проволоки (или фольги) от 0,02 до 0,05 мм. Основные конструктивные формы тензоэлементов представлены на рис. 2.3.

Изменение электрического сопротивления тензоэлемента пропорционально относительной деформации детали в месте наклейки последнего. Относительный коэффициент передачи тензодатчика $K_{отн}=(\Delta R/R)/(\Delta l/l)$. Материал для тензоэлементов должен характеризоваться возможно большей тензочувствительностью и возможно меньшим температурным коэффициентом. Обычно используются сплавы: константан, манганин, нихром, а также чистые металлы: никель, висмут. Очень высокую тензочувствительность, в 60-80 раз выше, чем у металлов, имеют полупроводники: германий, кремний и др. Полупроводниковые тензоэлементы получают выращиванием кристаллов полупроводника на мембране из диэлектрического металла (например, датчики «кремний на сапфире»).

Достоинства тензорезисторных преобразователей: простота конструкций, малые габариты, высокая точность, безинерционность; недостатки: невысокая чувствительность, зависимость сопротивления от температуры.

Низкая чувствительность тензорезисторных преобразователей требует применения усилителей выходного сигнала, а термозависимость – применения специальных мер для устранения влияния температуры.

Тензопреобразователи находят применение в датчиках силы натяжения каротажного кабеля с подвесным роликом ДНТ-033 ($\delta \leq 1{,}5\%$ при усилии до 500 *Н*) [2,17], в некоторых опробователях пластов в качестве измерителей

пластового давления (например, в ОПД-7-10), в некоторых скважинных уровнемерах типа погружных манометров [2].

Автором тензорезисторный преобразователь применен в расходомере РГЖ-1, не содержащем вращающихся деталей [19]. Чувствительным элементом этого прибора служат две гибкие пластины, установленные вдоль измеряемого потока. Поскольку давление в движущемся флюиде понижается, пластины прогибаются навстречу друг другу тем больше, чем выше скорость потока (рис. 2.4). Прогиб пластин преобразуется в электрический сигнал с помощью наклеенных на них тензоэлементов. Для устранения влияния температуры на пластине наклеены 4 тензоэлемента (2 вдоль нее и 2 поперек), соединенные по мостовой схеме. В одну диагональ моста подается переменный ток питания (частота I кГц), к другой диагонали подключен усилитель. Чувствительность описанного расходомера составляет 0,05 л/с.

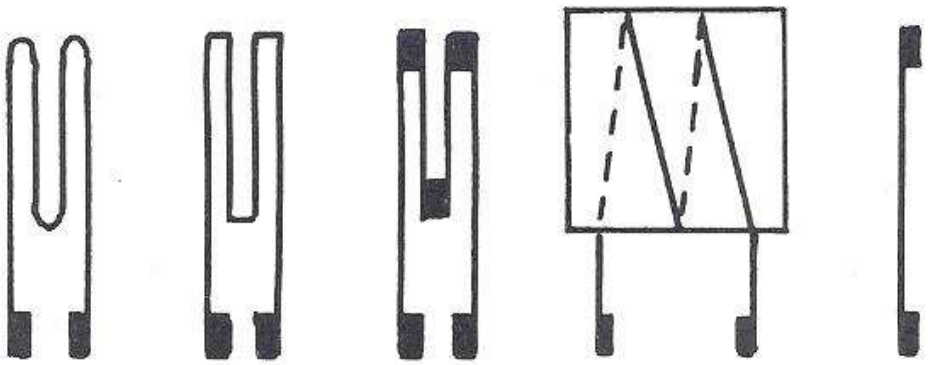


Рис. 2.3. Разновидности тензорезисторов

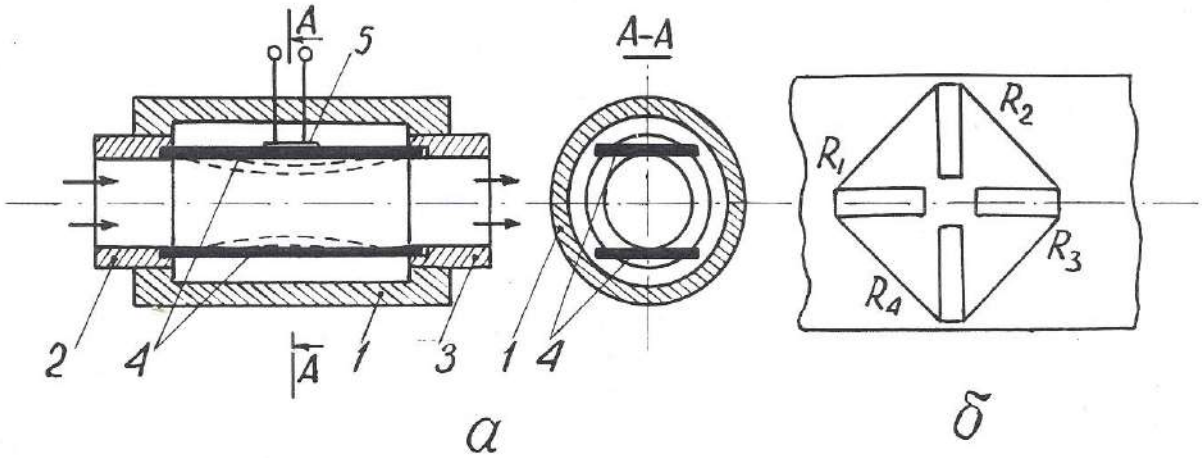


Рис. 2.4. Принцип действия расходомера РГЖ-1 (а) и размещение тензорезисторов на упругой пластине (б): 1 – корпус расходомера; 2 – входной канал; 3 – выходной канал; 4 – упругие пластины; 5 – тензометрический преобразователь прогиба пластины в электрический сигнал

2.1.4. Электролитические преобразователи

Преобразователи этого типа основаны на изменении электрического сопротивления между помещенными в электролит электродами в зависимости от расстояния между ними, площади соприкосновения с электролитом или проводимости последнего (2.1). Электролитические датчики используются для измерения угловых и линейных перемещений, а также для определения сопротивления электролита. Во избежание погрешностей, связанных с электролизом и электродной поляризацией, их включают, как правило, в цепь переменного тока.

Достоинства датчиков этого типа заключаются в простоте конструкции и способности пропускать большие токи; недостатки – в зависимости сопротивления электролита от температуры (при изменении последней на 1° электропроводность растворов изменяется на 1,5-2,5%).

В геофизической аппаратуре электролитические датчики используются в резистивиметрах всех видов: скважинных и переносных (например, в приборе ПР-1).

Еще один пример применения датчик этого типа устройство для определения направления и скорости потока подземных вод [20]. Это устройство содержит цилиндрическую измерительную камеру с перфорированными стенками, по окружности которой размещены радиальные электроды а в середине – центральный (рис. 2.5). Каждый из электродов подсоединен к своей жиле многожильного каротажного кабеля (например, кабеля КГ17-60-180ШМ. Внутри камеры располагается также магнитная стрелка с экраном из изоляционного материала на северном конце. Измерительная камера закрывается крышкой и заполняется электролитом через специальные отверстия в ней. Затем устройство опускают в скважину и устанавливают напротив исследуемого водоносного горизонта. По кабелю

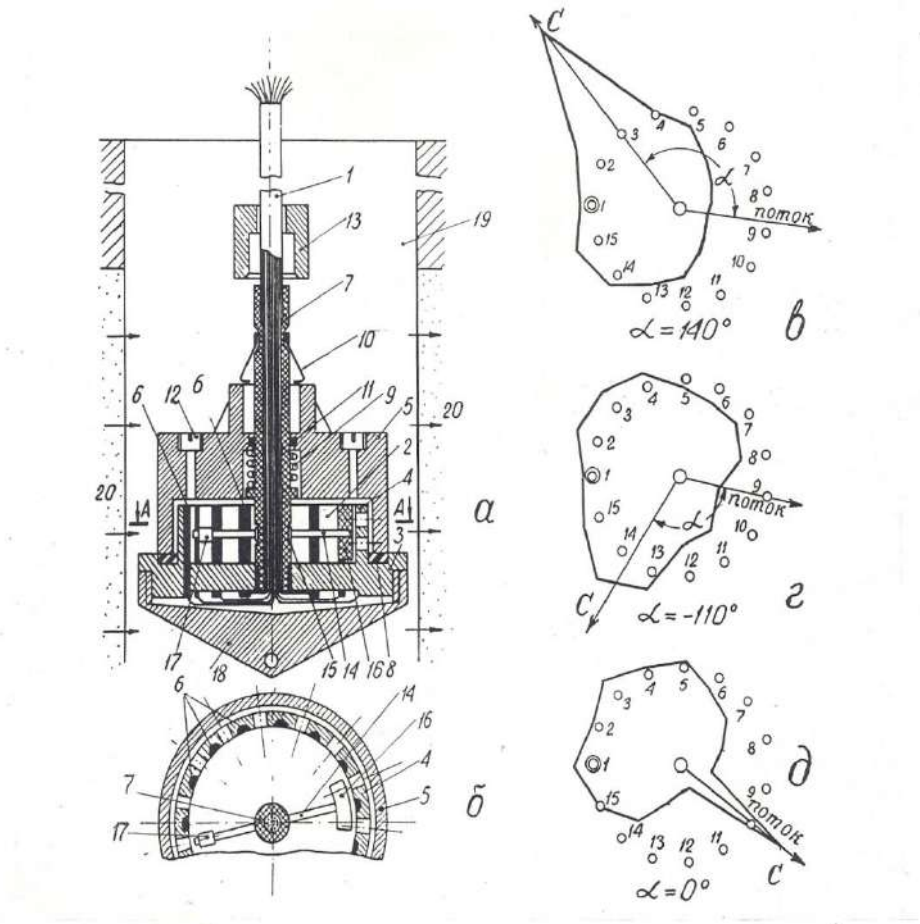


Рис. 2.5. Устройство для определения направления и скорости потока (а, б) и результаты измерений магнитного азимута потока (в-д): 1 – многожильный каротажный кабель; 2 – измерительная камера; 3 – изоляционный диск; 4 – перфорированные стенки камеры; 5 – крышка; 6 – радиальные электроды; 7 – центральный электрод; 8 – резиновая прокладка; 9 – сжатая спиральная пружина; 10 – пружинные защелки; 11 – резиновое кольцо; 12 – заливная пробка; 13 – сбивающий грузик; 14 – магнитная стрелка; 15 – скользящий подшипник; 16 – изоляционный экран; 17 – противовес; 18 – нижний наконечник.

опускают сбивающий грузик, который приводит в действие пружину, отбрасывающую крышку вверх по кабелю. Движением подземных вод электролит из измерительной камеры вымывается по направлению потока через перфорацию в стенках. Магнитная стрелка ориентируется по направлению магнитного меридиана, а экран на ее северном конце перекрывает один из

радиальных электродов. На поверхности производят измерения электрического сопротивления между центральным и каждым из радиальных электродов. Минимальное сопротивление указывает направление потока подземных вод, а максимальное – направление на север. Скорость потока определяют по скорости вымывания электролита из измерительной камеры, повторяя измерения через определенные интервалы времени. При использовании 17-жильного кабеля устройство обеспечивает абсолютную погрешность в измерении направления потока, не превышающую ±12°.

2.1.5.Терморезистивные преобразователи

Терморезистивные преобразователи основаны на свойстве металлов и полупроводников изменять свое сопротивление под действием температуры Т.

Зависимость сопротивления металлов от температуры в общем случае нелинейна, однако, для ограниченных интервалов температур ее можно представить в виде линейной двучленной функции $R_т=R_0[1+\alpha(T-T_0)]$, где R_0 – сопротивление при начальной температуре T_0, а α – температурный коэффициент сопротивления для интервала $T – T_0$.

Основным материалом для терморезисторов являются чистые металлы: платина, медь, никель, которые обладают в интервале от О до 100°С положительным α=0,0030–0,0068 (град.С)$^{-1}$.

Известны также объемные полупроводниковые терморезисторы (термисторы). Их сопротивление уменьшается с повышением температуры по экспоненте, в среднем для них α=0,03-0,04 (град. С)$^{-1}$, но значение α сильно зависит от температуры. Чувствительность (статический коэффициент передачи) терморезисторов $K_{ст}=\Delta R/\Delta T=\alpha R_0$.

Достоинства терморезистивных преобразователей: простота конструкции, малые габариты, возможность установки в труднодоступных местах. Однако им присущи и важные недостатки. Во-первых, это постоянство α лишь в ограниченном диапазоне температур и, во-вторых, инерционность, приводящая

к большим динамическим погрешностям. Как известно, термопреобразователь приобретает температуру среды по закону $\Delta T=\Delta T_0 \cdot e^{-t/\tau}$ где ΔT_0 - начальная разность температур, t – время, τ – постоянная времени преобразователя, зависящая от его конструкции и теплопроводности, а также тепловых свойств среды.

В геофизическом приборостроении преобразователи этого типа находят применение в скважинных термометрах электрических (СТС-2, ЭТМИ-55 и др.) и электронных (ТЭГ-36, ТЭГ-60 и др.).

Чувствительный элемент всех скважинных термометров представляет собой тонкую (0,02-0,03 мм) медную проволочку, сложенную в несколько раз и помещенную в тонкостенную медную трубку длиной около 30 см, омываемую скважинным флюидом [9].

Точно так же устроен чувствительный элемент скважинных расходомеров типа термоанемометров СТД-2, СТД-4 [2]. Этот термоэлемент включается в мостовую измерительную схему и нагревается до температуры, превышающей температуру исследуемого потока. Мостовая схема балансируется при размещении чувствительного элемента в неподвижной жидкости. Когда жидкость приходит в движение, она охлаждает нагретый термоэлемент, тем сильнее, чем выше скорость ее движения.

В газокаротажных станциях (АГКС-64, АГКС-4 и др. для определения суммарного газосодержания в газовоздушной смеси эта смесь подается на термочувствительный элемент в виде тонкой платиновой проволочки, нагретой до 850° С и включенной в сбалансированную мостовую схему. Если в анализируемой смеси имеются углеводородные газы, то при 850°С они сгорают, выделяющееся тепло повышает температуру проволочки, увеличивая ее сопротивление и нарушая баланс мостовой схемы [17].

Аналогичным образом действуют приборы для определения содержания СО в выхлопных газах автомобиля [6].

Известны также устройства для определения направления потока подземных вод [24], содержащие нагреватель и расположенные вокруг него

термисторы. По измерениям температуры последних определяют, в каком направлении идет перенос тепла, т.е. происходит движение подземных вод.

2.1.6. Магниторезистивные преобразователи

Эти преобразователи основаны на свойстве некоторых материалов изменять свое электрическое сопротивление под действием магнитного поля (эффект Гаусса). Таким свойством обладает, например, сплав пермаллой (80% никеля, 20% железа). Степень изменения сопротивления магниторезистора зависит от магнитной индукции поля B и угла θ между ее направлением и направлением тока [6,16,22].

Магниторезисторы изготавливаются по тонкопленочной технологии в форме меандров (рис. 2.6).

Еще большим магнитоэлектрическим эффектом, чем сплавы металлов, обладают полупроводники (антимонид индия InSb и арсенид индия InAs).

Увеличение сопротивления магниторезисторов объясняется увеличением пути движения электронов и дырок под действием силы Лоренца. Чувствительность магниторезистивных датчиков $K_{диф}=\Delta R/\Delta B$ зависит от величины магнитной индукции: $\Delta R=R_0 \cdot A(vB)^n$, где A – так называемый «коэффициент формы», v – подвижность электронов: n – постоянный коэффициент (n=1–2), зависящий от B.

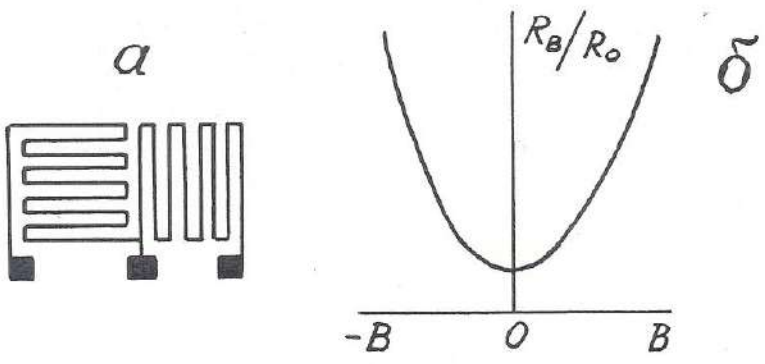


Рис. 2.6. Форма магниторезистора (а) и зависимость приращения его сопротивления от магнитной индукции (б)

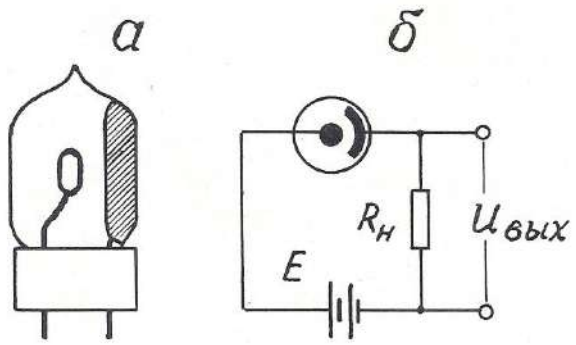


Рис. 2.7. Конструкция фотоэлемента с внешним эффектом (а) и включение его в измерительную схему (б)

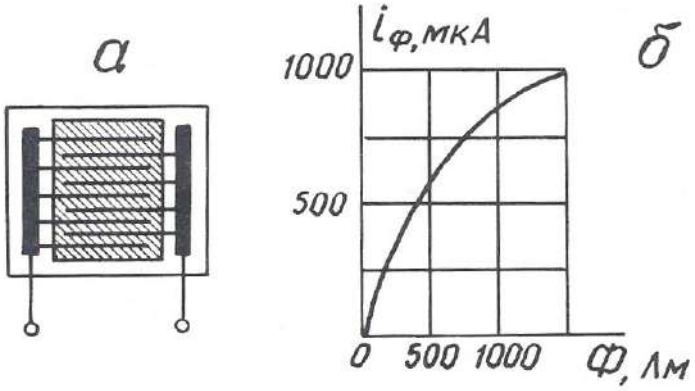


Рис. 2.8. Конструкция фотоэлемента с внутренним фотоэффектом (а) и зависимость фототока от светового потока (б)

При больших B значение n=1, поэтому при использовании магниторезисторов применяют магнитное смещение, помещая их в поле электромагнита с B=0,3 – 0,5 Тл.

Недостатки магниторезисторов: наличие температурного влияния и потребность в сильных магнитных полях.

Магниторезисторы в геофизике могут быть использованы в скважинных расходомерах и магнитных меткоуловителях каротажных станций.

2.1.7. Фотоэлектрические преобразователи

Фотоэлектрические преобразователи (фотоэлементы) основаны на явлении внешнего (электровакуумные и газонаполненные) или внутреннего (полупроводниковые) фотоэффекта.

Фотоэлемент с внешним фотоэффектом представляет собой электронную лампу с двумя электродами, один из которых (фотокатод) покрыт светочувствительным слоем (рис. 2.7). Возрастание фототока при увеличении приложенного напряжения происходит до величины тока насыщения, при котором все электроны, испускаемые фотокатодом под действием светового потока, достигают анода.

Фотоэлемент с внутренним фотоэффектом (фоторезистор) состоит из стеклянной пластины, на которой вытравлены входящие друг в друга гребневидные системы штрихов, заполненные электропроводным веществом (платина, золото). Пластина покрывается тонким слоем полупроводникового светочувствительного материала (рис. 2.8).

Чувствительность фотоэлементов $K_{диф}=\Delta R/\Delta Ф$ непостоянна и нелинейно зависит от светового потока Ф. Кроме того, фотоэлементы обладают еще и спектральной избирательностью» т.е. чувствительностью к световому излучению определенной длины волны.

Фотоэлементы могут быть использованы и в режиме источников тока, т.е. как генераторные преобразователи фотоэ.д.с.

Фотопреобразователи находят применение в приборах фотокаротажа, предназначенных для дифференциации разрезов скважин по цвету пород, в скважинных расходомерах (например, в ТСР-70Ф) в некоторых инклинометрах. Так, автором совместно с профессором. А.В.Давыдовым предложен датчик угла наклона буровой скважины для непрерывных измерений [27]. Этот датчик содержит измерительную камеру 1, частично заполненную жидкостью 2 с высоким коэффициентом поверхностного отражения, например, ртутью или сплавом Вуда, а над жидкостью соосно размещены источник света 3 и кольцевой фотопреобразователь 4 (рис. 2.9). При вертикальном положении датчика весь свет источника, отраженный от поверхности жидкости, попадает

на фотопреобразователь, и сигнал на его выходе максимален. При отклонении датчика от вертикали поверхность жидкости наклоняется относительно оси камеры, и часть отраженного света уходит за пределы фотопреобразователя. Выходной сигнал уменьшается тем сильнее, чем больше зенитный угол скважины.

2.2. Индуктивные преобразователи

Принцип действия индуктивных преобразователей основан на изменении электрического сопротивления *z* катушки индуктивности при изменении магнитного сопротивления ее сердечника. В свою очередь, магнитное сопротивление сердечника может быть изменено либо за счет изменения величины воздушного зазора в нем, либо за счёт изменения магнитных свойств материала, из которого он состоит.

2.2.1. Индуктивные преобразователи с изменяемым воздушным зазором

Входной величиной преобразователей этого типа обычно служат линейные или угловые перемещения. Чувствительность датчика $K_{диф}=\Delta z/\Delta x$.

Конструкции датчиков весьма разнообразны, некоторые из них, наиболее распространенные, представлены на рис. 2.10.

Независимо от конструкции датчика, его индуктивное сопротивление $z=j\,\omega\,L$, где ω – круговая частота тока в катушке; L – ее индуктивность. $L=W^2/R_\mu$, где W – число витков в катушке; R_μ – магнитное сопротивление сердечника. $R_\mu=R_ж+R_в$, где $R_ж$ – магнитное сопротивление железа сердечника; $R_в$ – магнитное сопротивление воздушного зазора. $R_в>>R_ж$. $R_в=\delta/(\mu_0\cdot S)$, где δ – длина воздушного зазора; S – его площадь; μ_0 – абсо-

лютная магнитная проницаемость воздуха. Таким образом, $z=-j\,\omega\,W^2\mu_0 S/\delta$, т.е. z обратно пропорционально δ и зависимость $z=f(\delta)$ нелинейна.

Линеаризовать эту зависимость удается в конструкции так называемых «дифференциальных» индуктивных преобразователей (рис. 2.11). В этих преобразователях, используются, две катушки индуктивности, включенные в мостовую схему и расположенные таким образом, что, когда индуктивное сопротивление одной увеличивается, сопротивление другой падает.

Достоинства индуктивных: преобразователей: отсутствие открытых электрических контактов, большая мощность вырабатываемого сигнала; недостаток – наличие электромагнитного взаимодействия между катушкой и сердечником (или его подвижной частью), отсюда – так называемая «реакция преобразователя».

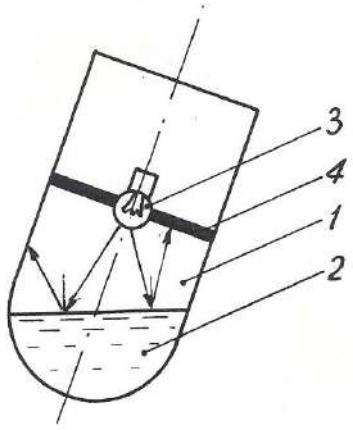


Рис. 2.9. Датчик угла наклона буровой скважины: 1 – измерительная камера; 2 – жидкость с высоким коэффициентом поверхностного отражения; 3 – источник света; 4 – кольцевой фотоприемник

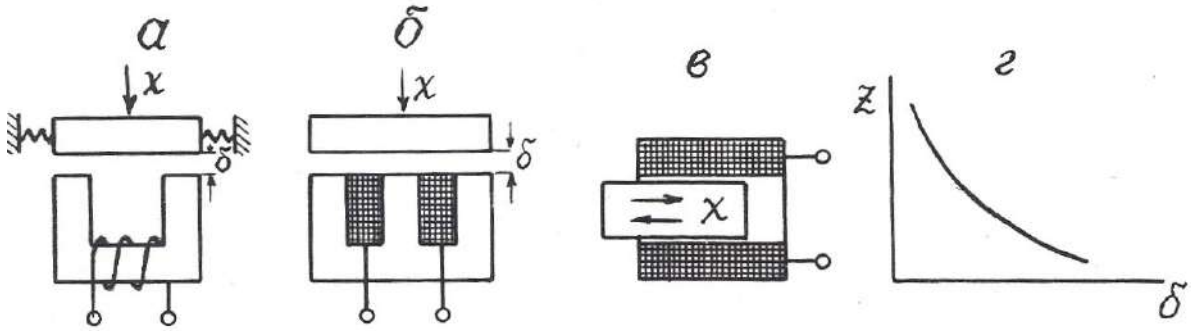


Рис. 2.10. Варианты выполнения индуктивных преобразователей с изменяемым воздушным зазором (*а-в*) и их статическая характеристика (*г*).

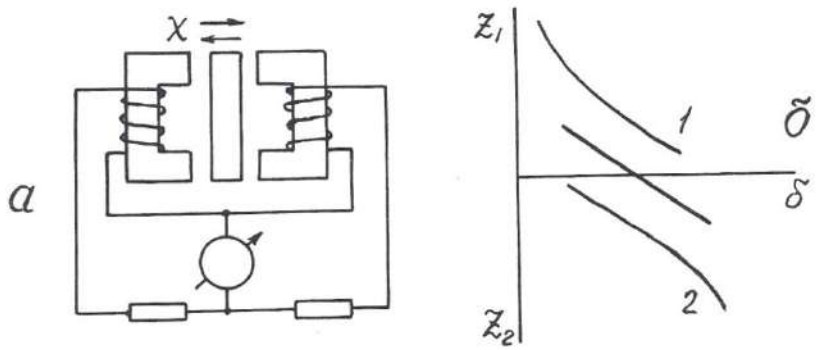


Рис. 2.11. Дифференциальный индуктивный преобразователь (а) и его статическая характеристика (б)

В геофизической аппаратуре индуктивные преобразователи находят применение в некоторых каверномерах и профилемерах (например, в профилемере ПМ-50) [2], в скважинных расходомерах ДАУ-3, РСИ-3 и ГЕО-В-600 (последний венгерского производства) [21], в индуктивных дефектомерах обсадных колонн.

2.2.2. Магнитоупругие преобразователи

Эти преобразователи основаны на взаимосвязи между магнитным и механическим состоянием ферромагнитных материалов.

Различают собственно **магнитоупругий эффект**, т.е. изменение магнитных свойств, в частности, магнитной проницаемости под воздействием меха-

нических деформаций, и обратное явление – **магнитострикционный эффект**, т.е. изменение формы и размеров ферромагнитных тел под воздействием внешнего магнитного поля.

В качестве материала для изготовления магнитоупругих датчиков используют сплавы: пермаллой, пермендюр, альсифер, ферриты, а также чистые металлы, например, никель. Конструкции преобразователей изображены на рис. 2.12.

Относительный коэффициент передачи магнитоупругого датчика $K_{отн}=(\Delta\mu/\mu)/(\Delta l/l)$ составляет около 200 и не остается постоянным при изменении размеров датчика (см. рис. 2.12, д).

Достоинства магнитоупругих датчиков: простота конструкции, прочность, удобство герметизации; недостатки: нелинейная статическая характеристика, наличие резонансной частоты.

Для стержневых датчиков (см. рис. 2.12, а, б) резонансная частота $f_0=V/2l$, где V – скорость упругих волн в материале сердечника, l – его длина; для кольцевого (см. рис. 2.12, в) – $f_0=V/2d$, где d – диаметр датчика.

Магнитоупругие преобразователи находят применение в аппаратуре акустического каротажа в качестве источников (магнито-стрикционные излучатели) упругих волн [12,17], в некоторых прихватоопределителях, а также в буровой технике – в измерителях нагрузки МКМ-2 буровых станков и в измерителях давления промывочной жидкости МИД-1, МИД-1А [5].

2.2.3. Магнитомодуляцнонные преобразователи

Эти преобразователи основаны на изменении магнитных свойств ферромагнитных материалов под действием магнитного поля.

Сердечники магнитомодуляционных преобразователей изготавливают в форме стержня с большим отношением длины l к диаметру d: $l/d>100$. При этом условии коэффициент размагничивания сердечника $N=0$ и даже в слабом магнитном поле, направленном вдоль его оси, сердечник намагничивается до

насыщения. При этом его относительная магнитная проницаемость падает до 1, хотя при ненасыщенном состоянии она очень велика – до 10000. Для того, чтобы намагнитить сердечник до насыщения, на него наносят обмотку возбуждения, по которой пропускают переменный ток.

В моменты как падения магнитной проницаемости (при возрастании намагничивающего поля до H_s), так и восстановления ее (при уменьшении намагничивающего поля ниже H_s) в обмотке индуцируются пики э.д.с. самоиндукции противоположных знаков. Частота этих пиков вдвое превышает частоту возбуждающего тока, как это можно видеть по рис.2.13.

При воздействии на датчик внешнего постоянного магнитного поля, направленного вдоль его оси, в один из полупериодов это поле складывается с магнитным полем катушки возбуждения, и сердечник доходит до насыщения быстрее, чем вне внешнего магнитного поля, в другой полупериод внешнее поле вычитается из поля катушки возбуждения, и сердечник не доходит до

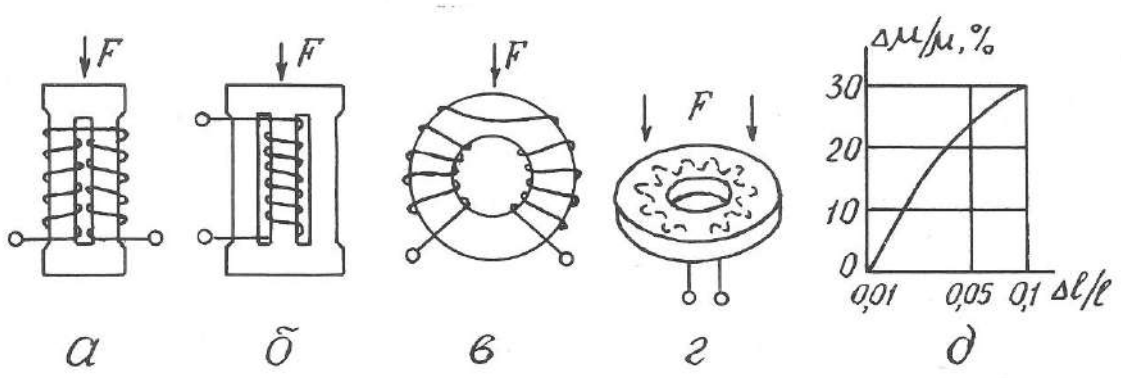


Рис. 2.12. Разновидности магнитоупругих преобразователей (а-г) и зависимость изменения магнитной проницаемости от изменения размеров преобразователя (д)

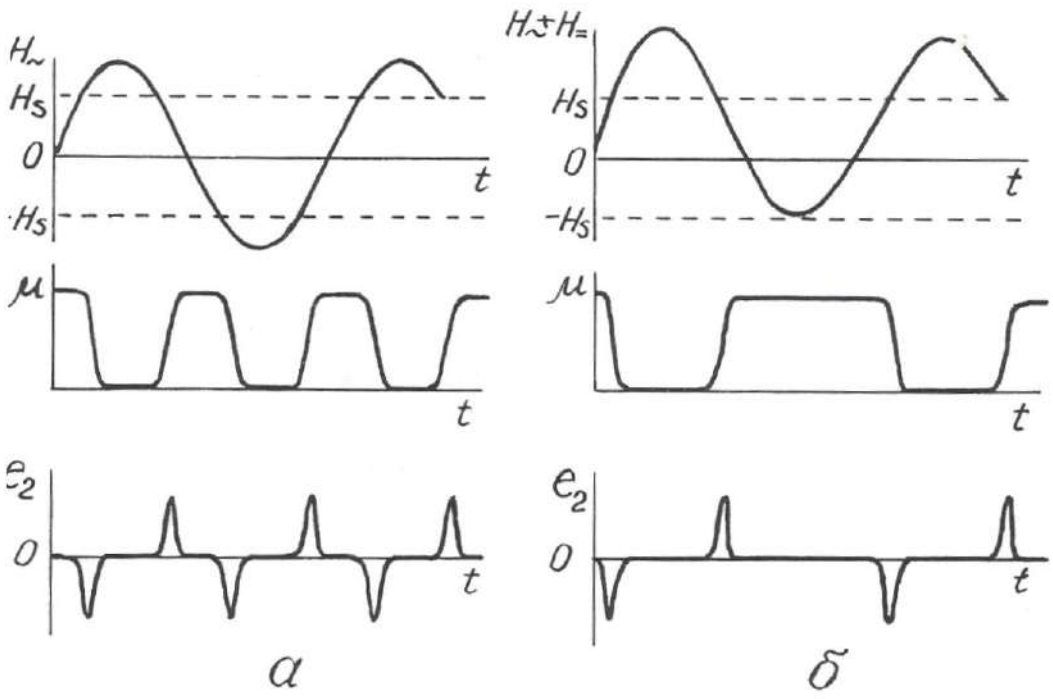


Рис. 2.13. Возникновение э.д.с. второй гармоники в магнитомодуляционном преобразователе в отсутствие (а) и при наличии (б) внешнего магнитного поля

магнитного насыщения, и нарушается симметрия перемагничивания сердечника.

Существуют 2-элементная и 1-элементная конструкции магнитомодуляционных датчиков (рис. 2.14). В 2-элементной имеются 2 параллельных сердечника, обмотки возбуждения на которых намотаны в противоположных направлениях и потому их магнитное поле имеет противоположное направление, а пики э.д.с. второй гармоники противоположны по знаку. По этой причине в сигнальной обмотке, охватывающей оба стержня, при отсутствии внешнего магнитного поля выходной сигнал равен 0. При наличии внешнего магнитного поля в один полупериод исчезает пара импульсов э.д.с. второй гармоники в одной обмотке, когда ее стержень не доходит до насыщения, в другой полупериод – не возникает такая же пара

импульсов в другой обмотке возбуждения и потому на выходе сигнальной обмотки будет существовать э.д.с. второй гармоники, имеющая частоту, удвоенную по сравнению с током возбуждения. Амплитуда этой э.д.с. пропорциональна напряженности внешнего магнитного поля, а фаза определяется направлением последнего.

В одноэлементных датчиках э.д.с. второй гармоники выделяется не с помощью дополнительной сигнальной обмотки, а с помощью фильтров, настроенных на ее частоту.

Достоинства магнитомодуляционных датчиков: простота, надежность, отсутствие открытых электрических контактов, высокая чувствительность; недостаток – необходимость в сложной измерительной схеме, обеспечивающей питание датчика переменным током, а также выделение и усиление сигнала второй гармоники. Дополнительный недостаток 2-элементных датчиков – большое количество выводов.

Магнитомодуляционные преобразователи находят широкое применение в магнитометрической аппаратуре – 2-элементные в полевых (М-17) и аэромагнитометрах (АММ-13, АСГМ-46) [3], 1-элементные – в скважинных

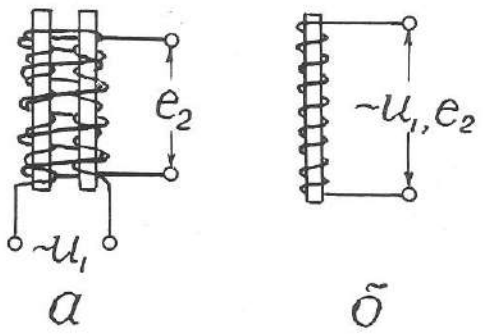


Рис. 2.14. Конструкция 2-элементного (а) и 1-элементного (б) магнитомодуляционного преобразователя

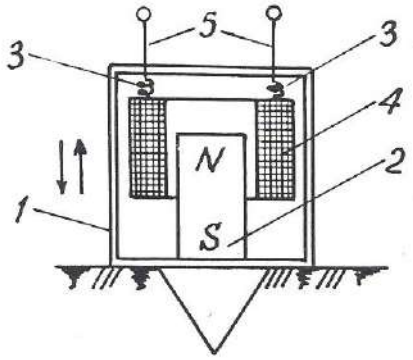


Рис. 3.1. Сейсмоприемник магнитоэлектрического типа: 1 – корпус; 2 – постоянный магнит; 3 – пружинки; 4 – катушка индуктивности; 5 – электрические выводы

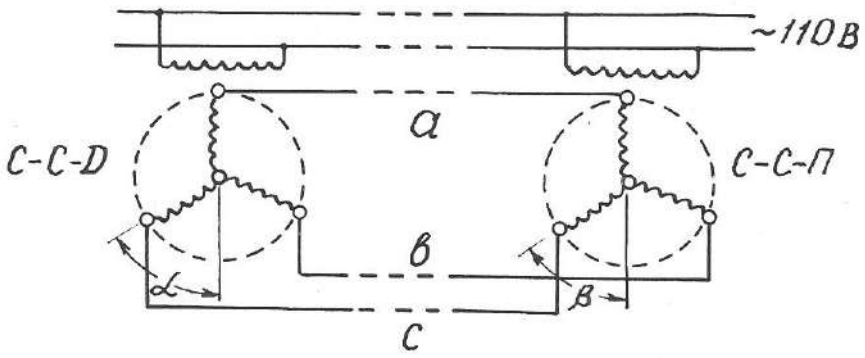


Рис. 3.2. Электрическая схема сельсинной передачи

магнитометрах ТСМ-3, ТСМК-40, ТСМК-30, КСМ-38 и др. [12,17]. Они используются также в скважинных расходомерах РЭТС-2 и магнитных меткоуловителях каротажных станций.

2.3. Емкостные преобразователи

Преобразователи этого вида основаны на изменении емкости C конденсатора под действием измеряемой величины.

Как известно, $C=\varepsilon S/\delta$ (2.2), где S – площадь обкладок конденсатора; δ – расстояние между ними; ε – диэлектрическая проницаемость среды между

обкладками. Следовательно, изменять емкость можно путем воздействия измеряемой величины либо на геометрические размеры датчика, либо на его диэлектрическую проницаемость. При этом очевидно, что датчики с изменяемыми параметрами S и ε имеют линейную статическую характеристику, а датчики с изменяемой величиной δ – нелинейную. В последнем случае для линеаризации характеристики возможно применение дифференциальных емкостных преобразователей, аналогичных по конструкции дифференциальным индуктивным датчикам.

Входными величинами емкостных датчиков могут быть линейные и угловые перемещения, механические усилия, деформации, изменение состава вещества.

Достоинства емкостных датчиков: высокая чувствительность, безинерционность, стабильность; недостаток – малая выходная мощность.

Датчики этого вида используются в аппаратуре диэлектрического каротажа ДК-1.Чувствительный элемент этой аппаратуры представляет собой цилиндрический конденсатор больших размеров, емкость которого зависит от диэлектрической проницаемости окружающих горных пород [2].

В так называемых «аквамерах» – приборах для определения количества воды в смесях «вода-нефть», откачиваемых из буровых скважин, также применяется емкостной датчик. Действие этого прибора основано на том, что у воды $\varepsilon=81$, а у нефти $\varepsilon=2{,}5$ отн.ед.(при температуре 18^0 С)

В некоторых скважинных термометрах используются в качестве частотозадающего элемента в схеме *RC*-генератора конденсаторы, емкость которых зависит от температуры.

Кроме того, известны скважинные емкостные измерители зенитного угла [25]. Их чувствительный элемент – конденсатор, одна обкладка которого представляет собой металлическую изолированную полусферу, установленную перпендикулярно оси прибора, а другая обкладка – залитую в эту сферу ртуть. При вертикальном расположении датчика емкость его максимальна, при наклоне – уменьшается.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные характеристики контактных преобразователей и приведите примеры их применения в геофизической аппаратуре (ГА).

2. Назовите основные характеристики реостатных преобразователей, приведите примеры их применения в ГА.

3. Назовите основные характеристики тензометрических преобразователей и приведите примеры их применения.

4.Назовите основные характеристики электролитических преобразователей и приведите примеры их применения в ГА.

5. Назовите основные характеристики терморезистивных преобразователей и приведите примеры их применения в ГА.

6. Назовите разновидности и основные характеристики фоторезистивных преобразователей, приведите примеры применения их в ГА.

7. Назовите разновидности индуктивных преобразователей.

8. Поясните принцип действия индуктивных преобразователей с изменяемым воздушным зазором, приведите примеры их применения в ГА.

9. Поясните принцип действия магнитоупругих преобразователей, приведите примеры их применения в ГА.

10. Поясните принцип действия магнитомодуляционных преобразователей, приведите примеры их применения.

11. Назовите основные характеристики емкостных преобразователей и приведите примеры их применения.

3.ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ГЕНЕРАТОРНОГО ТИПА

Во всех генераторных преобразователях выходной величиной является э.д.с., появляющаяся в результате воздействия измеряемой величины.

3.1. Преобразователи индукционной э.д.с.

Эти преобразователи основаны на явлении электромагнитной индукции, возникающей при воздействии на проводник переменного магнитного поля.

Изменение магнитного поля, воздействующего на проводник или, точнее, на катушку индуктивности, достигается либо за счет перемещения катушки относительно постоянного магнита, либо за счет изменения магнитного поля при неизменном расположении магнита и катушки индуктивности.

3.1.1 Преобразователи индукционной э.д.с, со взаимным перемещением магнита и катушки индуктивности

Э.д.с., возникающая в катушке индуктивности, зависит от следующих факторов: $e=BVlW\mathrm{Sin}\alpha$, где B – магнитная индукция; V – относительная скорость перемещения; α – угол между векторами V и B, l – длина витка и W – число витков в катушке.

Преобразователи этого вида широко используются в геофизической аппаратуре. Примером могут служить сейсмоприемники магнито-электрического типа (С210, СВ1-30 и др.), принцип действия которых иллюстрируется рис. 3.1 [3]. С корпусом приемника 1 жестко скреплен постоянный магнит 2. Над магнитом на пружинках 3 подвешена катушка индуктивности 4 с электрическими выводами 5. При колебаниях поверхности, на которой установлен сейсмоприемник, происходят взаимные перемещения магнита 2 и катушки индуктивности 4, и в последней наводится э.д.с.

Другой пример использования датчиков этого вида – автосинная (или сельсинная) передача, которая применяется в каротажных станциях для синхронизации движения носителя записи (диаграммной или магнитной ленты) с перемещением, зонда по скважине [12]. Принципиальная схема сельсинной передачи представлена на рис. 3.2. Передача содержит, по меньшей мере, две идентичных электрических машины, у которых статор имеет однофазную обмотку с явно выраженными полюсами, а ротор – трехфазную обмотку с неявно выраженными полюсами. Одна машина, называемая сельсином-

датчиком (ССД), устанавливается на блок-балансе, через который в скважину опускается кабель со скважинным снарядом. При движении кабеля по скважине блок-баланс через зубчатую передачу приводит во вращение ротор сельсина-датчика. Другая машина, называемая сельсином-приемником (ССП), устанавливается в регистрирующем приборе каротажной станции и играет роль привода его лентопротяжного механизма. Обмотки роторов ССД и ССП включены навстречу друг другу, а обмотки статоров питаются переменным током промышленной частоты от одного и того же источника. Переменный ток создает в обмотках статоров пульсирующие магнитные потоки, которые индуцируют в роторных обмотках э.д.с., зависящие от угла поворота ротора относительно статора. Если эти углы у роторов ССД и ССП одинаковы ($\alpha=\beta$), то э.д.с., в их обмотках равны и взаимно компенсируют друг друга. Токи в каждой роторной цепи равны нулю. Если эти углы не равны ($\alpha\neq\beta$), баланс э.д.с. нарушается, и в роторных обмотках возникают токи, которые создают в них магнитные поля, стремящиеся повернуть роторы до положения $\alpha=\beta$.Поскольку ротор ССД механически связан с роликом блок-баланса, находящегося под большой нагрузкой, то поворачивается все время ротор ССП, нагрузка на который меньше и который перемещает носитель записи синхронно с движением скважинного прибора. С одним и тем же ССД могут быть соединены несколько ССП, например, один в регистрирующем приборе, другой на панели лебедчика в блоке счетчика глубин.

Еще один пример применения датчиков этого вида – тахогенераторы – приборы для измерения скорости вращения [5]. В этих приборах ротор генератора вращается в поле постоянного магнита или электромагнита, а индуцируемая в нем э.д.с. выпрямляется и измеряется стрелочным или цифровым прибором. Такие тахогенераторы также используются в каротажных станциях для измерения скорости движения скважинного снаряда. Приводом ротора тахогенератора служит один из сельсинов-приемников автосинной передачи.

3.1.2. Преобразователи индукционной э.д.с. со стационарным размещением магнита и катушки индуктивности

В преобразователях этого вида изменение магнитного поля достигается за счет перемещения ферромагнитных масс в воздушном зазоре между магнитом и катушкой индуктивности. В общем случае э.д.с. индукции пропорциональна скорости изменения магнитного потока Ф и числу витков в катушке: $e=-wd\Phi/dt$.

На рис. 3.3 представлено несколько примеров применения преобразователей этого вида в геофизической аппаратуре.

В скважинном каппаметре Н. А. Иванова (рис. 3.3, а) датчик представляет собой катушку индуктивности с большим количеством витков, намотанную на постоянном стержневом магните. Когда такой датчик перемещается по стволу скважины мимо горных пород с повышенными магнитными свойствами, это вызывает изменение магнитного потока через катушку индуктивности, и в ней

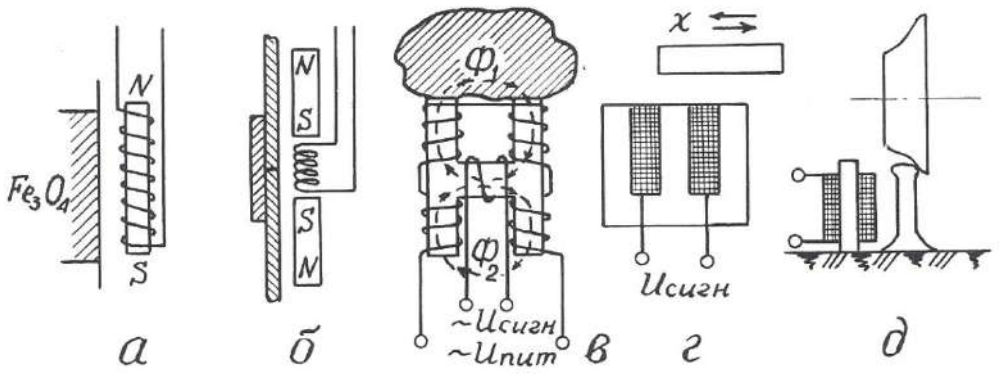


Рис. 3.3. Примеры применения преобразователей индукционной э.д.с.: а – скважинный каппаметр Н. А. Иванова; б – локатор муфт; в – лабораторный измеритель магнитной восприимчивости; г – счетчик количества; д – счетчик вагонеток

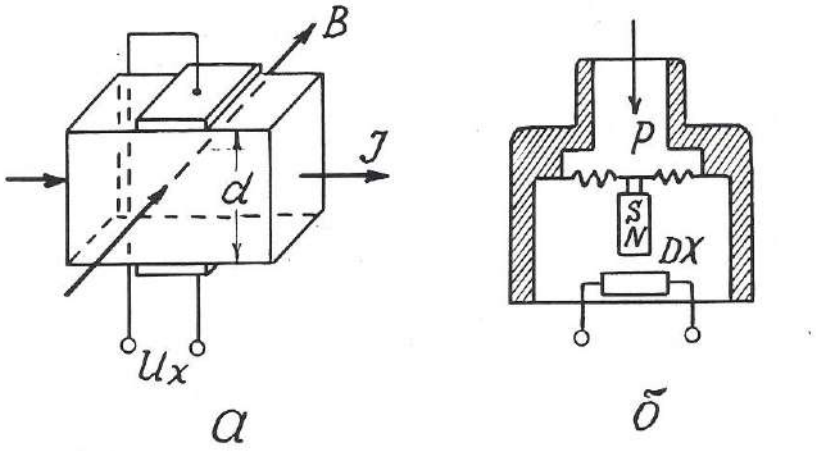


Рис. 3.4. Принцип действия преобразователя Холла (а) и его применение в манометре мембранного типа (б)

возникает э.д.с., пропорциональная магнитной восприимчивости горных пород. В наземном измерительном пульте эта э.д.с., усиливается, выпрямляется и выводится на регистрирующий прибор.

В 50-60 годах каппаметры Н. А. Иванова успешно применялись для исследования скважин на железорудных месторождениях Урала, но потом были заменены более совершенными приборами, поскольку описанный датчик имеет один явный недостаток – сигнал на его выходе зависит не только от магнитных свойств среды, но и от скорости перемещения датчика.

До настоящего времени при исследованиях обсаженных скважин применяются так называемые «локаторы муфт» – приборы, предназначенные для определения положения соединительных муфт обсадных колонн в скважинах [17].

Локатор муфт (рис. 3.3, б) содержит катушку индуктивности и два идентичных постоянных магнита, размещенных выше и ниже нее навстречу друг другу одноименными полюсами. Когда такой прибор перемещается по стальной трубе, имеющей постоянную толщину стенок, магнитные потоки верхнего и нижнего магнитов равны и в области расположения катушки

индуктивности компенсируют друг друга. Когда же прибор проходит через соединительную муфту, то из-за увеличения толщины стали сначала усиливается магнитный поток одного (верхнего), а затем другого (нижнего) магнита. В результате в катушке возникает пара разнополярных импульсов э.д.с., которые и регистрируются на диаграммной ленте.

Еще один пример применения преобразователей данного вида – измерители магнитной восприимчивости образцов горных пород (прибор ИМВ-2) [3]. Датчик измерителя (рис. 3.3, в) представляет собой «Н» – образный сердечник с четырьмя обмотками возбуждения на концах сердечника и одной измерительной обмоткой на его «перекладине». Обмотки возбуждения подключены к источнику переменного тока и соединены таким обрезом, чтобы магнитные потоки, создаваемые ими в «перекладине» сердечника, были направлены навстречу друг другу. Когда датчик находится в воздухе, эти потоки взаимно компенсируются, и сигнал в измерительной обмотке равен нулю. Когда к рабочей поверхности датчика прикладывается образец с повышенной магнитной восприимчивостью, магнитный поток, проходящий через него, увеличивается, и в измерительной обмотке наводится э.д.с., которая затем усиливается и измеряется.

Датчики данного вида находят также применение в технике как счетчики металлических предметов (рис. 3.3, г), счетчики вагонеток (рис. 3.3, д) и т.п. [5].

Общими достоинствами преобразователей индукционной э.д.с. является большая мощность выходного сигнала и отсутствие открытых электрических контактов, недостатком – наличие электромагнитного взаимодействия между магнитом и катушкой индуктивности.

3.2. Преобразователя гальваномагнитной э.д.с.

3.2.1. Преобразователи Холла

Преобразователи этого вида основаны на эффекте Холла, наблюдаемом в полупроводниках. Этот эффект проявляется в возникновении разности потенциалов U_x на обкладках датчика, по которому протекает ток I, при помещении его в магнитное поле, направленное перпендикулярно току. Принцип действия преобразователя Холла поясняется рис. 3.4.

$U_x=K_x \cdot IB/d$, где B – магнитная индукция; d – толщина датчика; K_x – коэффициент Холла, зависящий от характеристики материала и размеров датчика. Эффект Холла наблюдается в таких полупроводниковых материалах, как антимонид индия (InSb), арсенид индия (InAs), арсенид галлия (GaAs), арсенид-фосфат индия ($InAs_{0,8}P_{0,2}$) и др. Чистые полупроводники германий и кремний имеют очень высокое значение коэффициента Холла, но весьма чувствительны к режиму работы.

Датчики Холла используются для измерения перемещений, давления, числа оборотов и скорости вращения.

Достоинство датчиков: высокая чувствительность; недостатки: потребность во внешнем источнике питания, высокое выходное сопротивление и необходимость в высоком внутреннем сопротивлении источника питания, наличие четырех выводов.

В геофизической аппаратуре датчики Холла могут быть использованы для улавливания магнитных меток на каротажном кабеле (патент США № 4709208) или для измерения давления (рис. 3.4, б).

Отечественная приборостроительная промышленность выпускает микросхемы серии К1116 с датчиками Холла для магнитного управления электрическими цепями [16].

3.2.2. Преобразователи Виганда

Магнитобистабильный преобразователь Виганда состоит из специально обработанной проволоки из сплава викаллой (ванадий-10%, кобальт-52%, железо-38%) небольшого диаметра (около 0,3 мм), на которую нанесена

обмотка индуктивности (рис. 3.5). При помещении датчика в магнитное поле в момент превышения напряженностью поля определенного порога направление намагниченности сердечника катушки спонтанно меняется, и в катушке возникает импульс напряжения длительностью около 20 мкс. При длине датчика 15 мм и числе витков w=1300 выходное напряжение достигает 2,5 В [6].

Достоинства датчиков Виганда: большой выходной сигнал, отсутствие внешнего питания, широкий температурный диапазон (от - 196 до + 175° С), искробезопасность.

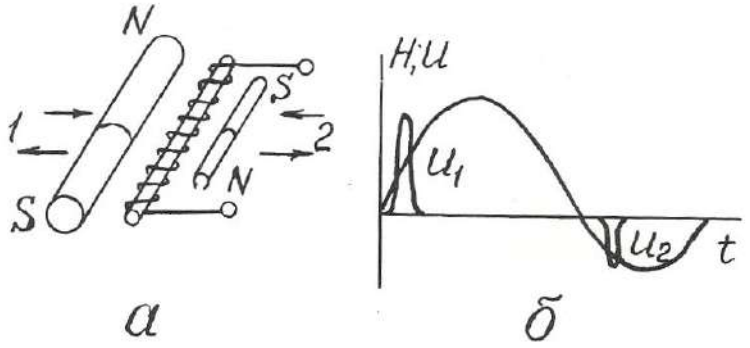


Рис. 3.5. Устройство преобразователя Виганда (а) и осциллограмма его выходного сигнала (б)

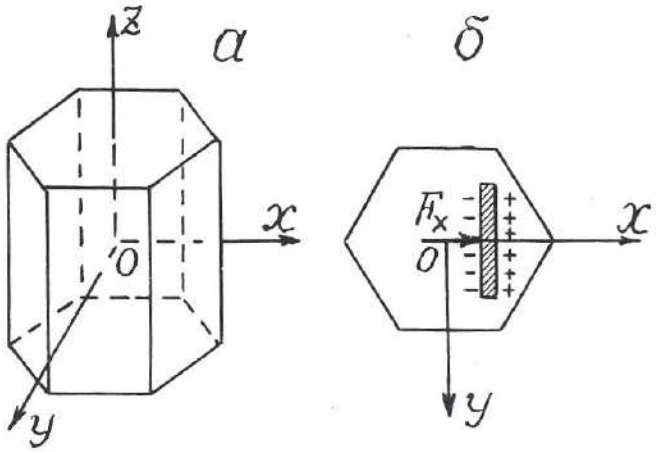


Рис. 3.6. Основные оси кристалла кварца (а) и возникновение пьезоэ.д.с. на кварцевой пластине (б)

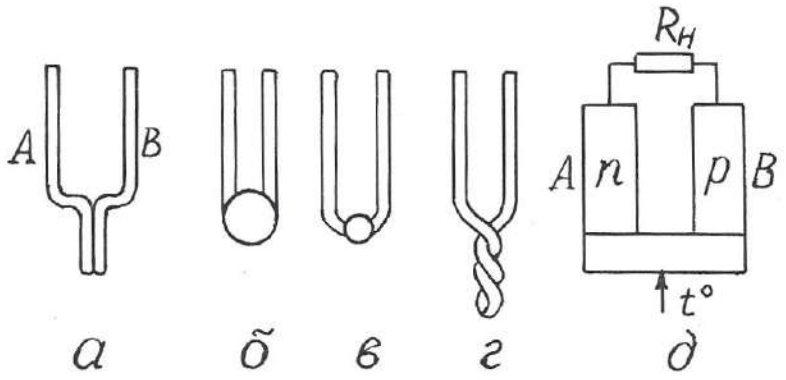


Рис. 3.7. Преобразователи термоэ.д.с. металлические (а-г) и полупроводниковые (д)

Ввиду того, что датчики Виганда были разработаны сравнительно недавно, в конце 80-х годов, они пока еще не используются в геофизической аппаратуре, хотя и могли бы найти применение, например, в магнитных меткоуловителях, устройствах блокировки, каротажных станций и других приборах.

3.3. Преобразователи пьезоэ.д.с.

Действие пьезопреобразователей основано на пьезоэлектрическом эффекте, который возникает в результате взаимосвязи между механическим и электрическим состоянием некоторых диэлектрических материалов, называемых **пьезоэлектриками**.

Различают **прямой пьезоэффект**, заключающийся в возникновении электрических зарядов на гранях кристаллов пьезоэлектриков под действием механических напряжений и исчезновении их после снятия нагрузки, и **обратный пьезоэффект**, проявляющийся в изменении формы и размеров пьезоэлектриков под действием электрического поля.

Способность к пьезоэффекту характеризуется пьезоэлектрической постоянной (пьезомодулем), величина которой определяется электрическим зарядом в Кл, возникающим вод действием внешней силы в 1 Н: $K_{пэ}=Q/F$.

Наиболее сильно пьезоэффект выражен у сегнетоэлектриков – веществ с аномально высокой диалектрической проницаемостью. К ним относиться сегнетовая соль, кварц, турмалин, титанат бария и некоторые другие вещества.

Самая высокая пьезоэлектрическая постоянная у сегнетовой соли ($C_4H_4O_6KNa$): $K_{пэ}=300\cdot10^{-12}$ Кл/Н; у титана бария ($BaTiO_3$) $K_{пэ}= 100\cdot10^{-12}$ Кл/Н; у кварца $K_{пэ}=2{,}1\cdot10^{-12}$ Кл/Н.

Основные свойства пьезоэлектрических датчиков рассмотрим на примере кварца. Кристалл кварц имеет главную оптическую ось *z*, нейтральную или механическую ось *y*, и электрическую ось *x* (рис.3.6). Максимальный пьезоэффект наблюдается при воздействии механических нагрузок вдоль электрической оси *x*, поэтому пластины для пьезопреобразователей вырезают из кристаллов кварца перпендикулярно оси *x*.

Возникновение пьезоэффекта объясняется тем, что под действием механических сил происходит смещение электрических зарядов – одна область кристалла заряжается положительно, другая – отрицательно.

Достоинства преобразователей этого вида: безынерционность, линейная статическая характеристика, высокая собственная частота, малые габариты; недостатки: утечка зарядов с течением времени, необходимость гидроизоляции.

Применяются пьезопреобразователи для измерения динамических нагрузок, деформаций, перемещений.

В геофизической аппаратуре пьезопреобразователи используются в качестве приемников упругих колебаний в скважинных приборах акустического каротажа (СПАК-2, СПАК-4, СПАК-6 и др.). Такой пьезоэлектрический сейсмоприемник изготавливается в виде полой сферы из пьезокерамики, внутренняя и внешняя поверхности которой имеют серебряное покрытие для облегчения снятия с них электрических зарядов. От промывочной жидкости в скважине сейсмоприемник отделен слоем резины [2,17].

В полевой геофизике существует сейсмоэлектрический метод разведки, который заключается в возбуждении с помощью взрыва пьезоэффекта на

кристаллах естественных пьезоэлектриков в условиях их коренного залегания и в измерении этого эффекта с помощью системы электродов [3].

В быту пьезопреобразователи используются в качестве звукоснимателей в электропроигрывателях, в зажигалках для газовых плит (прямой пьезоэффект), в звукоизлучателях электронных часов и ПЭВМ (обратный пьезоэффект) [22].

3.4. Преобразователи термоэ.д.с.

Преобразователи этого вида основаны на термоэлектрическом эффекте, заключающемся в том, что в цепи из двух разнородных проводников при поддержании разных температур в точках их соединения возникает э.д.с., пропорциональная разнице этих температур (эффект Зеебека) [22].

Термоэлектрические преобразователи называют термопарами а проводники А и В, из которых они состоят – термоэлементами (рис. 3.7).

Один **чувствительный спай** термоэлементов подвергают воздействию измеряемой температуры, температуру другого, **опорного**, поддерживают постоянной.

Чувствительность термопреобразователей составляет от 5 до 60 мкВ/К.

Наибольшую чувствительность имеют термопары, составленные из двух полупроводников с различной (электронной и дырочной) природой проводимости.

Достоинства термопреобразователей: отсутствие источников питания, линейная статическая характеристика, большой диапазон измеряемых температур; недостаток: малая мощность сигнала отдельной термопары.

В геофизике используются металлические термопреобразователи в качестве термометров для исследования скважин на месторождениях парогидротерм, полупроводниковые – в качестве датчиков в полевой терморазведке.

В технике термопары используются в системах автоматического регулирования температуры в различных металлургических процессах. В годы

Великой Отечественной войны выпускались батареи полупроводниковых термопреобразователей, которые надевались на стекло керосиновой лампы и вырабатывали электроэнергию, достаточную для питания лампового приемника или рации.

3.5. Преобразователи фотоэ.д.с.

В этих преобразователях используются два полупроводника с разным характером проводимости (рис. 3.8, а). На их контакте происходит взаимная диффузия электронов в *p*-полупроводник, дырок – в *n*-полупроводник. Дырки рекомбинируют с электронами, в результате на контакте полупроводников образуется тонкий запирающий слой – «*p*-*n*-переход». Такие преобразователи могут работать в режиме источника тока и фотодиода.

При отсутствии светового облучения через такой преобразователь проходит очень небольшой, так называемый «темновой ток», соответствующий обратному току диода. При световом облучении *p*-*n* -перехода кванты света образуют добавочные носители тока.

Под действием разности потенциалов потенциального барьера *p*-*n*-перехода электроны перемещаются в зону *n*-полупроводника, а дырки – в зону *p*-полупроводника, создавая фотоэ.д.с., на выводах прибора. На рис. 3.8, а электроны и дырки, прошедшие через *p*-*n*-переход в результате диффузии и создавшие потенциальный барьер *p*-*n*-перехода, условно обозначены как «+» и «-» без кружочков. Добавочные дырки и электроны, возникшие под действием облучения, показаны как «+» и «-» в кружочках. Стрелками показано направление действующих на них сил поля *p*-*n*-перехода.

На рис. 3.8, б показан разрез германиевого фотодиода, состоящего из пластины германия 1 с проводимостью *n*-типа, которая сплавлена с индием 2 (проводимость *p*-типа). Толщина слоя германия над индием настолько мала, что кванты света свободно проникают через него в зону *p*-*n*-перехода. Корпус 3 выполнен из оргстекла и залит компаундом 4.

Спектральные характеристики фотопреобразователей зависят от используемых в них материалов.

Интегральная чувствительность германиевых фотопреобразователей имеет наибольшее значение $K_{диф}=\Delta I/\Delta\Phi=20$ мА/лм. Э.д.с. фотогенераторов не превышает 0,12-0,5 В.

Преобразователи фотоэ.д.с. изготавливаются из кремния, селена, сернистого таллия и сернистого серебра. Достоинством селеновых фотопреобра-

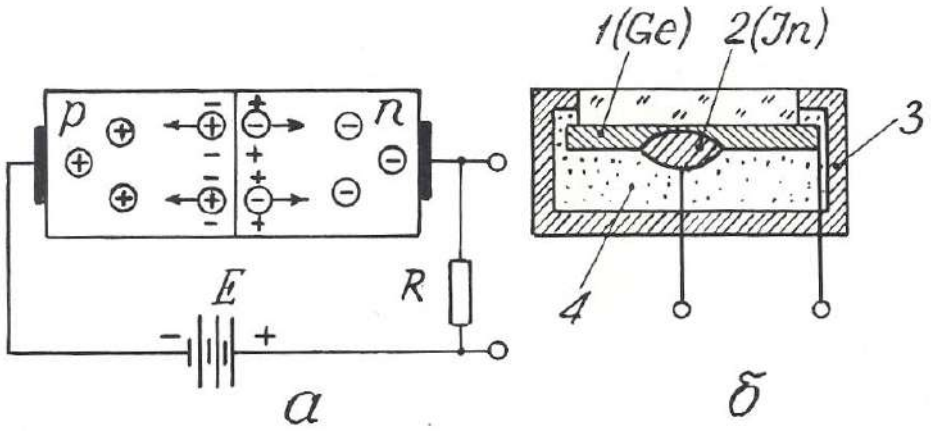


Рис. 3.8. Преобразователь фотоэ.д.с.: принцип действия (а) и конструкция (б)

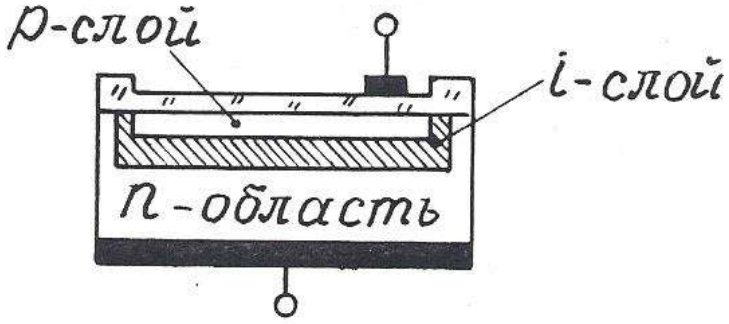


Рис. 3.9. Структура *pin*-диода

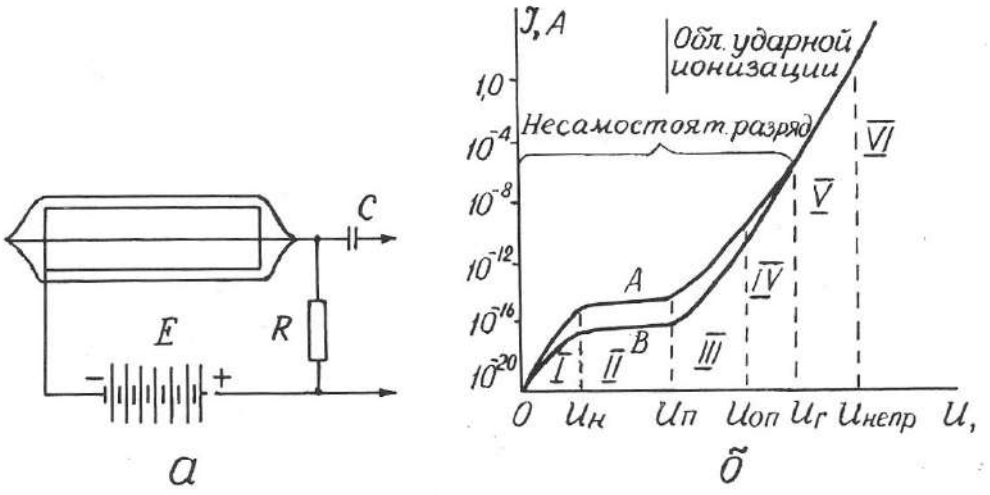


Рис. 4.1. Устройство газоразрядного счетчика (а) и его вольт-амперная характеристика (б): А – β-частица; В – γ-квант

зователей является их спектральная чувствительность, близкая к чувствительности человеческого глаза.

Для увеличения количества дополнительных носителей, образующихся в *p*-*n*-переходе под действием светового облучения, между *p* и *n*-полупроводниками располагают дополнительный слой нелегированного высокоомного кремния (*i*-слой) – рис. 3.9. Такие фотоэлектрические приборы носят название *pin*-диодов. Область применения их в геофизической аппаратуре та же, что и фоторезистивных датчиков (см. раздел 2.1.7).

Контрольные вопросы

1. Назовите основные характеристики преобразователей индукционной э.д.с., их разновидности и приведите примеры их применения в технике и геофизической аппаратуре (ГА).

2. Поясните принцип действия датчика Холла и объясните его устройство (рис. 3.4, а).

3. Поясните принцип действия и устройство датчика Виганда (рис. 3.5).

4. Поясните принцип действия преобразователей пъезоэ.д.с. и приведите примеры их применения в ГА.

5. Поясните принцип действия преобразователей термоэ.д.с. и приведите примеры их применения в технике и ГА.

6. Поясните принцип действия преобразователей фотоэ.д.с. и приведите примеры их применения.

4. РАДИАЦИОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

В настоящем пособии будут рассмотрены только те радиационные преобразователи, которые преобразуют энергию ядерного излучения в электрический сигнал. Эти преобразователи называются также детекторами радиоактивных излучений. Они бывают трех видов: газоразрядные, сцинтилляционные и полупроводниковые.

4.1. Газоразрядные детекторы

В газоразрядном детекторе происходит непосредственное преобразование энергии радиоактивного излучения в электрические импульсы.

Газоразрядный детектор представляет собой металлический цилиндр, по оси которого натянута тонкая металлическая нить. Цилиндр играет роль катода и подключается к «минусу» источника постоянного напряжения, нить (анод) – к «плюсу». И нить, и цилиндр могут быть помещены в стеклянный баллон (рис. 4.1, а). Полость детектора заполнена газом под низким давлением (примерно – $1{,}5 \cdot 10^4$ Па). При прохождении через детектор нейтроны и гамма-кванты взаимодействуют с атомами вещества его катода и газового наполнителя, вызывая ионизацию газа и, как следствие, прохождение кратковременного импульса тока, сила I которого зависит от напряжения U между электродами. При схеме включения детектора, изображенной на рис. 4.1, а, на нагрузочном сопротивлении R импульс тока создает отрицательный импульс напряжения, который через разделительный конденсатор C подается на усилительно-регистрирующую схему [13].

Зависимость $I=f(U)$ или вольт-амперная характеристика счетчика приведена на рис. 4.1, б. В ней выделяются шесть областей, отличающихся по механизму переноса ионов в электрическом поле счетчика. В области I при

малых напряжениях на электродах ток возрастает пропорционально напряжению, т.к. с ростом напряжения уменьшается количество рекомбинирующихся ионов и все большее их количество достигает электродов счетчика. Эта область (от 0 до $U_н$) называется **омической**. Начиная с некоторого значения $U_н$, ток достигает насыщения (все ионы долетают до анода и катода) и перестает возрастать. Величина ионизационного тока во II области (от $U_н$ до $U_п$) определяется только количеством ионов, образующихся в единицу времени. Преобразователи, работающие в этой области, носят название **ионизационных камер**. При дальнейшем, свыше $U_п$ росте напряжения, несмотря на постоянство начальной ионизации, происходит рост тока в импульсе. Это связано с возникновением ударной ионизации, при которой электроны, образующиеся при первоначальном воздействии радиации, ускоряются электрическим полем счетчика настолько, что начинают ионизировать молекулы газового наполнителя. Отношение числа ионов, достигших анода счетчика, к числу первичных ионов, созданных регистрируемой частицей (или гамма-квантом), называется **коэффициентом газового усиления**. Величина его зависит от приложенного напряжения.

С возникновением ударной ионизации вначале ток возрастает пропорционально напряжению на электродах (область пропорциональности III от $U_п$ до $U_{оп}$), здесь отмечается относительно невысокий коэффициент газового усиления (до 10^4), а при дальнейшем увеличении U пропорциональность нарушается и от $U_{оп}$ до $U_г$ следует IV область – **ограниченной пропорциональности**. За ней идет область Гейгера (V), в которой амплитуда импульса не зависит от начальной ионизации. Коэффициент газового усиления достигает 10^8-10^9 и продолжает увеличиваться с ростом напряжения. За областью Гейгера следует область **непрерывного разряда** (VI), для возникновения которого не нужна первичная ионизация, достаточно к электродам счетчика приложить напряжение, превышающее $U_{непр}$.

Области V и VI – это области самостоятельного разряда, который не требует для своего поддержания внешних источников ионизации.

Газоразрядные детекторы, применяемые в геофизической аппаратуре, работают либо в пропорциональной области (пропорциональные счетчики), либо в области Гейгера (счетчики Гейгера-Мюллера).

Пропорциональные счетчики используются для измерения плотности потока тепловых нейтронов. Баллон счетчика заполняется трехфтористым бором (BF_3), обогащенным до 96 % изотопом B-10, имеющим большое сечение захвата тепловых нейтронов. При захвате нейтрона происходит реакция B (n,α) Li, α – частица производит первичную ионизацию в объеме счетчика. Для измерений нейтронов надтепловых энергий счетчик окружают сначала слоем водородсодержащего вещества, например, парафина, а затем тонким (около 0,5 мм) слоем кадмия. Кадмий поглощает тепловые нейтроны, а надтепловые в парафине замедляются до тепловых энергий и затем фиксируются счетчиком.

Счетчик Гейгера-Мюллера применяется для регистрации гамма-квантов. Он заполняется инертным газом (аргоном или гелием) с добавкой паров высокомолекулярных органических соединений (этилового спирта или этилового эфира) или галогенов (хлора, брома). Такая добавка способствует гашению непрерывного разряда, т.к, положительные ионы, образовавшиеся из молекул инертного газа, нейтрализуются при столкновениях с молекулами высокомолекулярного соединения или галогена и не вызывают вторичной электронной эмиссии с катода.

После регистрации каждой ионизирующей частицы газоразрядный счетчик не способен в течение некоторого «мертвого времени» $\tau_м$ (порядка 10^{-4} с) отмечать попадание следующей частицы или реагирует на нее образованием импульса пониженной амплитуды («время восстановления» – $\tau_в$). Величина «мертвого времени» и «времени восстановления» определяет разрешающую способность и эффективность преобразователя.

Разрешающей способностью преобразователя называют максимальное количество ионизирующих частиц N_{max}, которые могут быть уверенно зафиксированы преобразователем $N_{max}=I/(\tau_м+\tau_в)$.

Под **эффективностью счетчика** понимают отношение числа частиц, зарегистрированных счетчиком, к общему числу частиц, прошедших через объем счетчика. Эффективность газоразрядных счетчиков зависит от их конструкции, размеров и материала катода и обычно не превышает нескольких процентов.

Основной рабочей характеристикой газоразрядного преобразователя является его **счетная характеристика** – зависимость числа импульсов на его выходе от напряжения на электродах при постоянной интенсивности ионизирующего облучения (рис. 4.2). Участок *ав* в пределах которого выбирается рабочее напряжение счетчика $U_{раб}$, называется **плато**. Протяженность плато составляет от 200 до 300 В, а наклон – от 3 до 15 % на 100 В.

Достоинства газоразрядных детекторов: большая амплитуда сигнала, малая потребляемая мощность, широкий температурный диапазон; недостатки: потребность в источнике питания с высоким напряжением, ограниченный ресурс, для счетчиков Гейгера-Мюллера – независимость амплитуды выходного сигнала от энергии ионизирующего излучения.

Газоразрядные счетчики очень широко применялись во всех разновидностях геофизических радиометров: полевых, каротажных, автомобильных и самолетных [3,12]. В последнее время они в значительной мере вытеснены более эффективными сцинтилляционными детекторами.

4.2 Сцинтилляционные детекторы

Сцинтилляционный радиационный преобразователь (рис. 4.3) состоит из люминофора 1 (оптически прозрачного вещества, люминесцирущего под действием ядерного излучения), и фотоэлектронного умножителя 2 (ФЭУ).

В результате действия попавшей в сцинтиллятор элементарной частицы (или гамма-кванта) часть атомов сцинтиллятора переходит в возбужденное состояние. Обратный переход их в нормальное состояние сопровождается кратковременной (порядка 10^{-7}-10^{-9}с) световой вспышкой. Фотоны света

преобразуются в электрический сигнал с помощью ФЭУ, который представляет собой комбинацию фотоэлемента с электронным усилителем. Фотоны из сцинтиллятора 1 выбивают из фотокатода ФЭУ 3 электроны, которые под действием электрического поля устремляются к ближнему диноду 4, имеющему положительный потенциал. Вследствие вторичной электронной

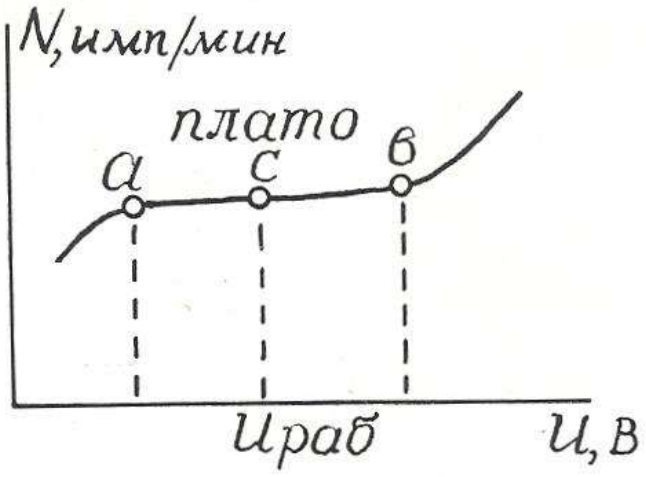


Рис. 4.2. Счетная характеристика газоразрядного счетчика Гейгера – Мюллера

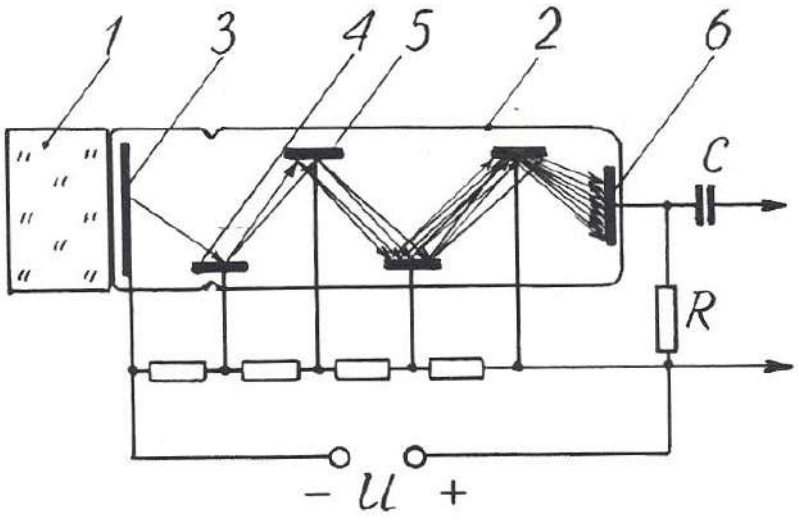


Рис. 4.3. Устройство сцинтилляционного преобразователя: 1 – кристалл-сцинтиллятор; 2 – фотоэлектронный умножитель (ФЭУ); 3 – фотокатод; 4 – первый динод; 5 – второй динод; 6 – анод (ФЭУ)

эмиссии каждый электрон "выбивает из динода вторичные электроны, которые притягиваются следующим динодом 5, имеющим более высокий потенциал, и также вызывают вторичную электронную эмиссию. Процесс развивается лавинообразно, в результате попаданию каждой ионизирующей частицы в кристалл-сцинтиллятор соответствует прохождение импульса тока между анодом 6 и катодом 1 ФЭУ, причем амплитуда этого импульса пропорциональна энергии ионизирующей частицы.

Эффективность сцинтилляционных детекторов намного выше, чем у газоразрядных, и достигает 20 %.

В качестве сцинтилляторов для регистрации гамма-квантов в геофизический аппаратуре используют монокристаллы соединений NaI, CsI, KI, активированных таллием (Tl), а для регистрации нейтронов – кристаллы сернистого цинка ZnS с добавками серебра или меди. Примесь активатора (Tl, Ag, Cu) в люминофоре способствует созданию в решетках кристаллов-сцинтилляторов дополнительных центров люминесценции [13].

Счетная характеристика сцинтилляционных преобразователей имеет плато очень небольшой протяженности, вследствие чего эти преобразователи требуют питания высокостабилизированным напряжением.

Преимущества сцинтилляционных преобразователей перед газоразрядными: высокая эффективность, большая разрешающая способность, зависимость амплитуды выходного сигнала от энергии ионизирующего излучения, что позволяет изучать энергетический спектр последнего.

Эти преимущества обеспечивают широкое распространение детекторов этого вида в разнообразных радиометрах: полевых (СРП-68-02), скважинных (ДРСТ-3, Кура-2м и др.), самолетных (АСГМ-46 и др.).

К недостаткам сцинтилляционных детекторов можно отнести низкую термостойкость и термостабильность, что требует их термостатирования в скважинных радиометрах [9].

4.3. Полупроводниковые детекторы

Полупроводниковые детекторы (ППД) устроены и действуют совершенно аналогично преобразователям фотоэ.д.с., рассмотренным в разделе 3.5. Отличие заключается только в том, что в ППД образование свободных носителей в зоне *p*-*n*-перехода происходит за счет действия не фотонов света, а ионизирующего ядерного излучения.

Амплитуда импульса на выходе ППД пропорциональна числу носителей зарядов, образованных ионизирующей частицей, а следовательно, ее энергии, что дает возможность изучать энергетический спектр излучения.

Для создания *i*-слоя в ППД используют литий, обладающий высоким коэффициентом диффузии, который добавляют в торец полупроводника с *p*-проводимостью.

Преимущества полупроводниковых детекторов: экономичность питания, весьма малые размеры и хорошее амплитудное разрешение (в 20-30 раз лучше, чем у сцинтилляционных преобразователей).

Однако их распространение ограничено. Это связано, во-первых, со сравнительно небольшими размерами чувствительной части детектора, и во-вторых, с необходимостью охлаждения детектора до низких температур (от -100 до -196^0), которое повышает их эффективность.

Контрольные вопросы

1. Какие существуют преобразователи ядерных излучений в электрический сигнал?

2. Объясните устройство газоразрядного преобразователя.

3. Объясните вольт-амперную характеристику (рис. 4.1, б) газоразрядного детектора.

4. Чем отличаются счетчики Гейгера-Мюллера от пропорциональных счетчиков?

5. Объясните устройство и работу сцинтилляционного детектора.

6. Назовите преимущества сцинтилляционных детекторов перед газоразрядными.

7. Объясните устройство и работу полупроводникового детектора, укажите его достоинства и недостатки.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Алиев Т. М., Тер-Хачатуров А. А*. Измерительная техника: Учебн. пособие для техн. вузов. – М.: Высшая школа, 1991. – 384 с.

2. *Аппаратура и оборудование для геофизических исследований нефтяных и газовых скважин:* Справочник /А. А.Молчанов, В. В. Лаптев, В. М. Моисеев, Р. С.Челокьян. – М.: Недра, 1987. – 263 с.

3. *Бондаренко В. М., Демура Г. В., Ларионов А. М.* Общий курс геофизических методов разведки: Учебн. пособие для техникумов. – П.: Недра, 1986. – 453 с.

4. *Бриндли К*. Измерительные преобразователи: Справочное пособие / Пер.с англ. – М.:Энергоатомиздат, 1991. – 144 с.

5. *Бухгольц В. П.* Датчики и реле автоматического контроля в горной промышленности. – М.: Недра, 1971. – 224 с.

6. *Виглеб Г.* Датчики / Пер. с нем. – М.: Мир, 1989. – 196 с.

7. *Енохович А. С.* Краткий справочник по физике. – М.: Высшая школа, 1976. – 288 с.

8. *Зачиевский Т., Мальзахер С., Квецинский А.* Промышленная электроника / Пер.с польского. – М.; Энергия, 1976. – 640 с.

9. *Зельцман П. А.* Конструирование аппаратуры для геофизических исследований скважин. – М.: Недра, 1968. – 180 с.

10. *Зимодро А. Ф., Скибинский Г. Л.* Основы автоматики. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 160 с.

11. *Квартин М. И.* Электромеханические и магнитные устройства автоматики и их расчет. – М.: Высшая школа, 1973. – 344 с.

12. *Кривко Н. Н., Шароварин В. Д., Широков В. Н.* Промыслово-геофизическая аппаратура и оборудование: Учебн. пособие для вузов. – М.: Недра, 1981. – 280 с.

13. *Ларионов В. В.* Радиометрия скважин. – М.: Недра, 1969. – 327 с.

14. *Левшина Е. С., Новицкий П. В.* Электрические измерения физических величин. Измерительные преобразователи. – Л.: Энергоатомиздат, 1983.

15. *Литвак В. И.* Тензореле. Расчет, конструирование, применение. – М.: Машиностроение, 1989. – 160 с.

16. *Логинов В. И.* Электрические измерения механических величин / Изд. 2-е, доп. – М.: Энергия, 1976. – 104 с.

17. *Померанц Л. И., Белоконь Д. В., Козяр В. Ф.* Аппаратура и оборудование геофизических методов исследования скважин: Учебн. пособие для техникумов. – М.: Недра, 1985. – 271 с.

18. *Сковородников И. Г., Калашников В. Н.* Дистанционный уровнемер для испытательных скважин // Геофизическая аппаратура. Вып.89. – Недра, 1988. – С. 98-103.

19. *Сковородников И. Г., Макаров Л. В., Калашников В. Н.* Газожидкостный расходомер РГЖ-Г: Техническое описание. – Свердловск: СГИ, 1988. – 15 с.

20. *Сковородников И. Г., Макаров Л. В., Калашников В. Н.* Изучение скорости и направления движения подземых вод // Гидрогеология и инж. геология: Обзор / ВНИИ экон. минер. сырья и геологоразв. работ. – М.,1987. – 33 с.

21. *Сковородников И. Г., Макаров Л. В., Калашников В. Н.* Скважинные тахометрические расходомеры / СГИ. – Свердловск, 1989. – 65 с. – Деп. в ВИНИТИ, №7609-В89, 1989.

22. *Справочник по средствам автоматики* / Под ред. В. Э. Низэ, И.В.Антика. – М.: Энергоиздат, 1983. – 504 с.

23. *Электрические измерения неэлектрических величин* / А. М. Туричин, П. В. Новицкий, Е. С. Левшина и др.; Изд. 5-е, перераб. и доп. – Л.: Энергия, 1975. – 676 с.

24. А. с. 491895. Зонд для измерения направления и скорости движения грунтовых вод /Б. Н. Халтурин, В. С. Лившиц // Бюл. изобр. – 1975, №42.

25. А. с. 1063990. Емкостной датчик зенитного угла / О. В.Фомин // Бюл. изобр. – 1983, № 48.

26. А. с. 1158750. Скважинный уровнемер (его варианты) / В. Н. Калашников, И. Г.Сковородников // Бюл. изобр. – 1985, № .20.

27. А. с. 1509518. Датчик угла наклона буровой скважины / А. В. Давыдов, И. Г. Сковородников // Бюл. изобр. – 1989, № 35.

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ

«Уральский государственный горный университет»

ОДОБРЕНО
методической комиссией
факультета геологии и геофизики
Председатель комиссии



_____В. И. Бондарев
«20» марта 2020 г.

В. М. Сапожников

ГЕОЛОГО – ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАЛЕЖЕЙ НЕФТИ И ГАЗА

Учебное пособие

по дисциплине «Геолого – геофизическое моделирование разрабатываемых залежей нефти и газа» по специальности 21.05.03 Технология геологической разведки
для студентов очного, заочного обучения специализации «Геофизические исследования скважин»

Екатеринбург - 2020

УДК 550.83
С19

Рецензент: *Александров В.М.* канд. геол. – мин., наук, доцент каф. «Геологии месторождений нефти и газа» Тюменского государственного нефтегазового университета

Печатается по решению Редакционно – издательского совета Уральского государственного горного университета

Сапожников В. М.

ГЕОЛОГО _ ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАЛЕЖЕЙ НЕФТИ И ГАЗА: учебное пособие / В. М. Сапожников ;
Уральский гос. горный ун – т. – Екатеринбург: Изд – во УГГУ, 2020– 66 с.

Пособие представляет конспект лекций по курсу «Геолого – геофизическое моделирование разрабатываемых залежей нефти и газа, читаемый студентам очного обучения специализации «Геофизические исследования скважин». В нем изложены способы комплексного использования данных интерпретации сейсморазведки и ГИС, седиментационного и фациального анализа с целью построения объемных моделей залежей углеводородов на разных стадиях изучения и эксплуатации месторождений нефти и газа.

Рассмотрены методы оценки и учета геологической неоднородности при формировании представления о детальном строении залежей и определении запасов в них углеводородов. Приведены примеры геологического моделирования на этапах подсчета запасов и подготовки к проектированию и управлению разработкой месторождений нефти и газа.

Для студентов очного, заочного и дистанционного обучения по специализации «Геофизические исследования скважин».

Рис. 36, Библ. 11.

© Уральский государственный горный университет, 2020

Введение

Геолого – геофизическое моделирование (ГГМ) залежей нефти и газа проводится для получения необходимой информации используемой при подсчёте запасов и управлении разработкой месторождений углеводородов (УВ). Данные интерпретации ГИС с учётом результатов сейсморазведки 3-D и гидродинамических исследований позволяют решать следующие задачи:

- построить объёмную модель резервуара, содержащую информацию о промысловых свойствах и распределении в пространстве коллекторов, а также литологических и тектонических экранов;

- провести по ней подсчёт балансовых запасов углеводородов с прогнозом их извлекаемости;

- проектировать сеть дополнительных (разведочных, эксплуатационных, контрольных и нагнетательных) скважин на различных этапах разработки месторождений.

Моделирование залежей осуществляется на протяжении всего периода жизни месторождения, начиная от стадии завершения основных разведочных работ и кончая этапом его консервации с оценкой остаточных запасов с учётом существующих к этому моменту технологий извлечения углеводородов. Для моделирования создаётся база данных, которая последовательно пополняется и корректируется.

Построение начальной модели и её уточнение по мере извлечения добываемого продукта требует применения современной вычислительной техники и программных систем, позволяющих получать традиционные виды моделей в виде блок-диаграмм, карт, профилей, зависимостей, таблиц и т.д.

При изучении данного курса ставится задача познакомиться с принципами геолого-геофизического моделирования и получить навыки решения отдельных задач по формированию представления о строении в пределах месторождений геологической среды, пространственном положении, фильтрационно-емкостных свойствах и насыщенности углеводородами изучаемых объектов. Геологической основой моделирования могут служить обобщения, выполненные в учебном пособии (В. И. Русский). Более подробно технология геолого-геофизического моделирования изложена в учебнике и учебных

пособиях, подготовленных преподавателями РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, накопившим опыт исследований по теме рассматриваемой дисциплины [1,2].

1. Углеводородное сырьё и геологические структуры продуктивных горизонтов и пластов-коллекторов

1.1 Нефть и природные горючи газы

Нефть-маслинистая жидкость, представляющая сложный коллоидный углеводородный раствор. На дневной поверхности нефть имеет плотность 0,82 – 0,92 г/см^3, и лишь при обилии в ней смолистых веществ её плотность несколько выше 1 г/см^3. В пластовых условиях в нефти растворён газ и её плотность на 15-20 % ниже, чем на дневной поверхности. Нефти сильно разнятся по вязкости (сопротивлению перемещения при перепаде давления): от 5до 20000 мПа·с. При высокой температуре и наличии растворённого газа их вязкость заметно (до одного порядка) ниже, чем на дневной поверхности.

Природные горючие газы представляют собой смеси в основном метановых УВ и их часто называют сухими. Газы, растворённые в нефти, называют попутными или жирными. Они резко отличаются от сухих значительным содержанием этана, пропана, бутана и высших УВ. Относительная (в сравнении с воздухом) плотность горючих газов меняется от 0,5 (сухой газ) до 1 и более (попутный газ). Растворимость газа в нефти примерно в 10 раз выше, чем в воде и повышается с ростом давления, но уменьшается с увеличением температуры.

Газоконденсаты - это газообразные смеси, состоящие из жирных газов и нефтяных УВ, находящихся в газообразном или парообразном состоянии. При снижении температуры и давления из смеси выделяется жидкая фаза - конденсаты, плотность которых колеблется в пределах 0,6-0,8 г/см^3.

Газогидраты представляют соединения, в которых при низких температурах молекулы газов или легких нефтей проникают в кристаллическую решетку воды. Внешне газогидраты похожи на снег и широко распространены в зоне вечной мерзлоты.

1.2 Концепции образования месторождений нефти и газа

Согласно современным воззрениям нефть и горючие газы имеют преимущественно органическое происхождение. Однако в отдельных случаях они образуются в результате дегазации из мантии реакционных смесей водорода и простейших углеродистых соединений с их превращением в высокотемпературных очагах в нефтегазовые соединения.

Наиболее распространённый способ нефтегазообразования связан с многоступенчатым преобразованием органического вещества, содержавшегося в глинистых или карбонатных породах, накопленного в морских, прибрежно-морских или континентальных условиях. В этих погруженных на большие глубины нефтегазоматеринских породах под воздействием биохимических процессов, нарастания температуры и давления образуется кероген (подобие горючих сланцев с содержанием углерода (60 – 80%), водорода (6 – 10%), серы (2 – 9%) и др. компонентов). Из керогена со временем генерируются углеводороды, которые в свободном или растворённом состоянии мигрируют в вышерасположенные коллекторы. Одним из способов миграции углеводородных флюидов является газовый перенос рассеянных микрочастиц нефти. Благодаря процессам эффузии газы могут мигрировать даже через довольно плотные горные породы. Возможны поступления УВ из осадочных пород, оказавшихся из-за движения плит внутри кристаллического фундамента.

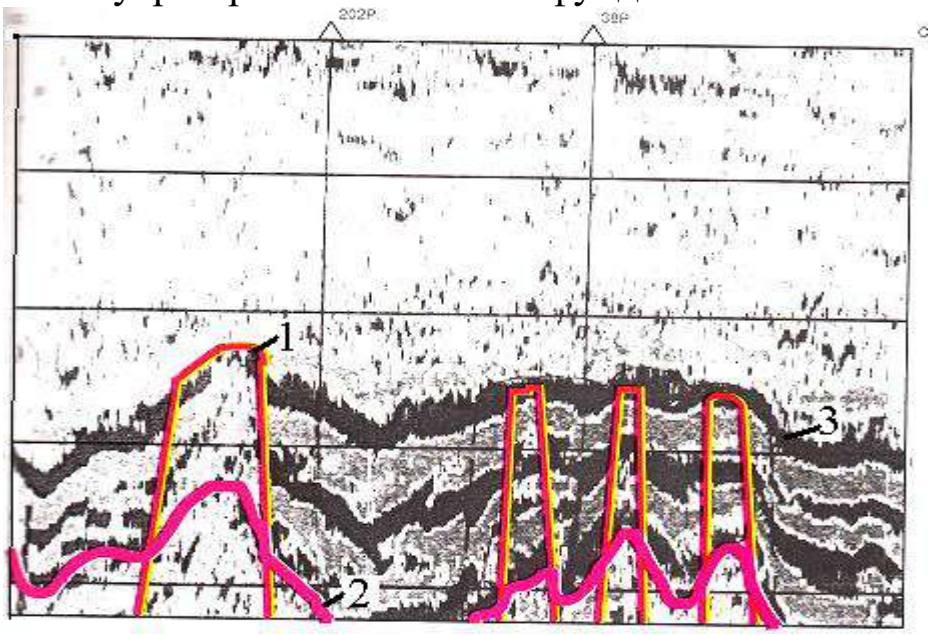


Рис.1.1. Фрагмент временного разреза с субвертикальными зонами деструкции (СЗД). Красноленинский свод (западная Сибирь). 1-проявления СЗД; 2- граница фундамента; 3- отражающие горизонты [5]

Транспортировка УВ осуществляется большей частью по субвертикальным зонам разрывных нарушений или деструкций щелевой или трубчатой формы (рис.1.1). При этом важную роль играют геосолитоны, возникающие под действием импульсного геодинамического поля Земли. Эти энергетические импульсы доставляют порции УВ к породам - коллекторам, закупоренным покрышками из непроницаемых образований [5].

Существование субвертикальных зон деструкции (СЗД) в земной коре, играющих важное значение для транспортировки УВ и их размещения в высокопористых геологических телах, требует считаться с возможностью формирования как моделей сплошных, так и дискретных геолого-геофизических сред. Влияние СЗД может проявиться возникновением в пределах нефтегазоносных залежей малоразмерных участков с резко повышенными величинами проницаемости коллекторов и дебита УВ.

Миграция УВ может происходить не только из пород, в которых они образовались в коллекторы, но и из одного пласта в другой по трещинным зонам в направлении снижения давления. Миграция внутри одного наклонного пласта под действием гидродинамического напора воды приводит к образованию единой залежи или нескольких залежей в ловушках пласта с изгибами (рис.1.2).

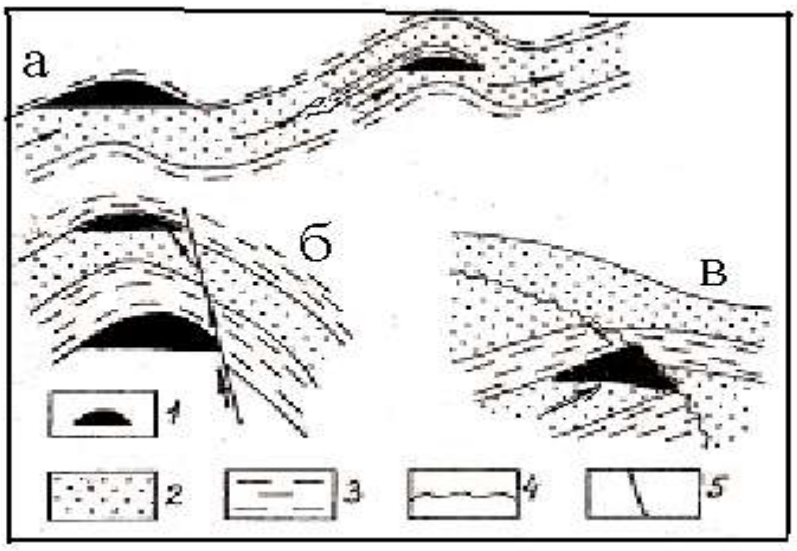


Рис. 1.2. Примеры проявления внутрипластовой и межпластовой миграция

1 – залежи УВ; 2 – пласт-коллектор; 3 – глины; 4 – поверхность несогласия; 5 – разрывное нарушение (В. И. Русский)

1.3. Формации и фации, благоприятные для нефтегазообразования и нефтегазонакопления

При построении геолого-геофизических моделей нефтегазовых месторождений необходимо учитывать их принадлежность к типам формаций и фаций, в которых они сформировались. Это позволяет использовать сведения о закономерностях присущих палеогеографическим и палеотектоническим обстановкам, в которых происходило образование этих месторождений, более успешно проводить корреляцию разрезов и прогнозировать качество пород-коллекторов и покрышек, а также распределение запасов УВ.

Формация представляет сообщество геологических тел, парагенетически связанных в возрастном и пространственном отношении, образовавшихся в определённых палеотектонических и палеогеографических условиях. По своему стратиграфическому объёму формация соответствует ярусу или отделу. Подавляющая часть нефтегазовых месторождений открыта в осадочных формациях. Для платформенных территорий типичны карбонатные, песчано-глинистые морские, песчано-глинистые угленосные и терригенно-карбонатные формации (Волго-Уральская, Западно-Сибирская, Восточно-предкавказская нефтегазоносные провинции и др.). Для складчатых областей более характерны флишоидные (чередование нескольких литотипов пород) и молассовые (чередование многочисленных маломощных песчано-глинистых слоев) формации (Предкавказская, Закавказская, Апшеронская нефтегазоносные провинции и др.).

Фация отражает обстановку осадконакопления и сами осадки. Интерес представляют фации благоприятные для формирования ловушек структурного и неструктурного типа и накопления УВ.

Среди морских фаций наиболее перспективны фации мелководья. Именно в прибрежной части палеоморей происходило формирование разнообразных песчаных образований, потенциально благоприятных для выполнения впоследствии роли коллекторов. Среди многообразия морских аккумулятивных форм наибольший интерес представляют устьевые и вдольбереговые бары, подводные валы, барьерные острова, косы, пляжи, а также отложения, сязанные с вдольбереговыми и разрывными течениями. Они представляют скопления обломочного материала, принесённого волнами или потоками течений. В процессе своего формирования эти преимущественно песчаные разноформенные тела (рис.1.3) могли быть отде-

лены от берега морем (бары, валы, тела промоин), прислонены к берегу (косы, пляжи). Могли также постепенно перемещаться в сторону берега (трангрессивные бары, барьерные острова) или моря (регрессивные бары), формироваться в понижениях пологого берега, заливаемых во время приливов (марши), и ограничиваться крутым уступом на берегу (клифом). Схематически картина образования таких песчаных тел изображена на рис. 1.4.

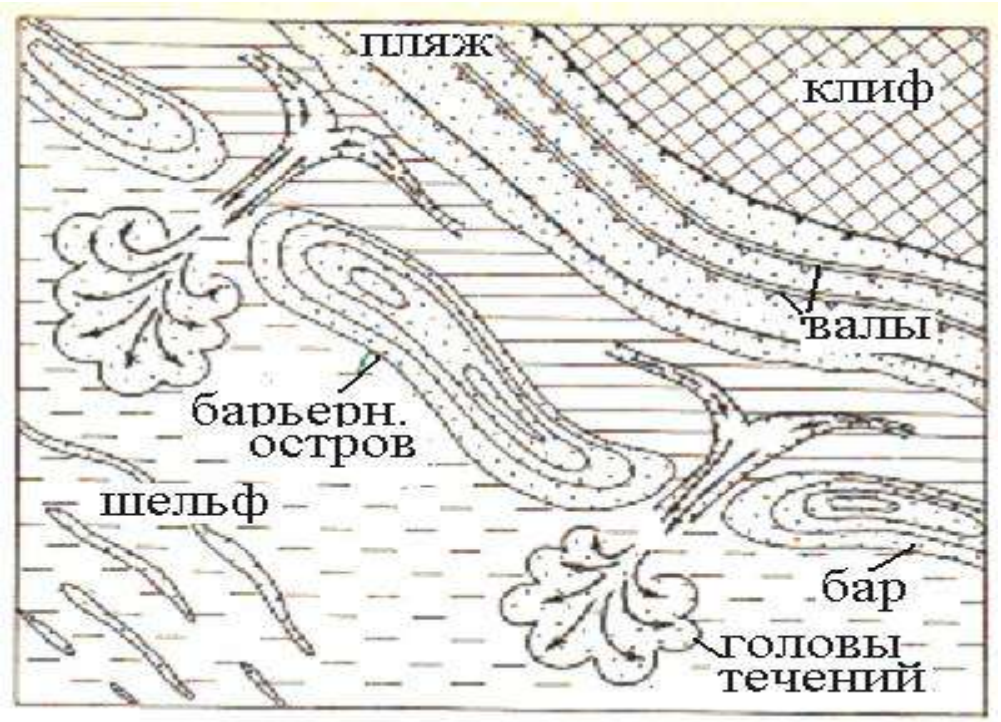


Рис. 1. 3. Схема образования и размещения аккумулятивных песчаных тел в прибрежной части мелководного моря (В. С. Муромцев)

Группа фаций мелководного шельфа формировалась в палеоморях на глубинах до ста метров. Здесь образовывались значительные скопления песчаного и алевритового материала, связанные с различного рода стоковыми течениями, которые заполняли крупные прогибы с формированием конусов выноса большой мощности. Глинистые породы распространены ограничено.

Мелководные морские отложения представляют скопления выдержанных по простиранию терригенных и карбонатных (органогенно-обломочных, рифогенных, оолитовых) пород, часто характеризующихся высокой пористостью и проницаемостью.

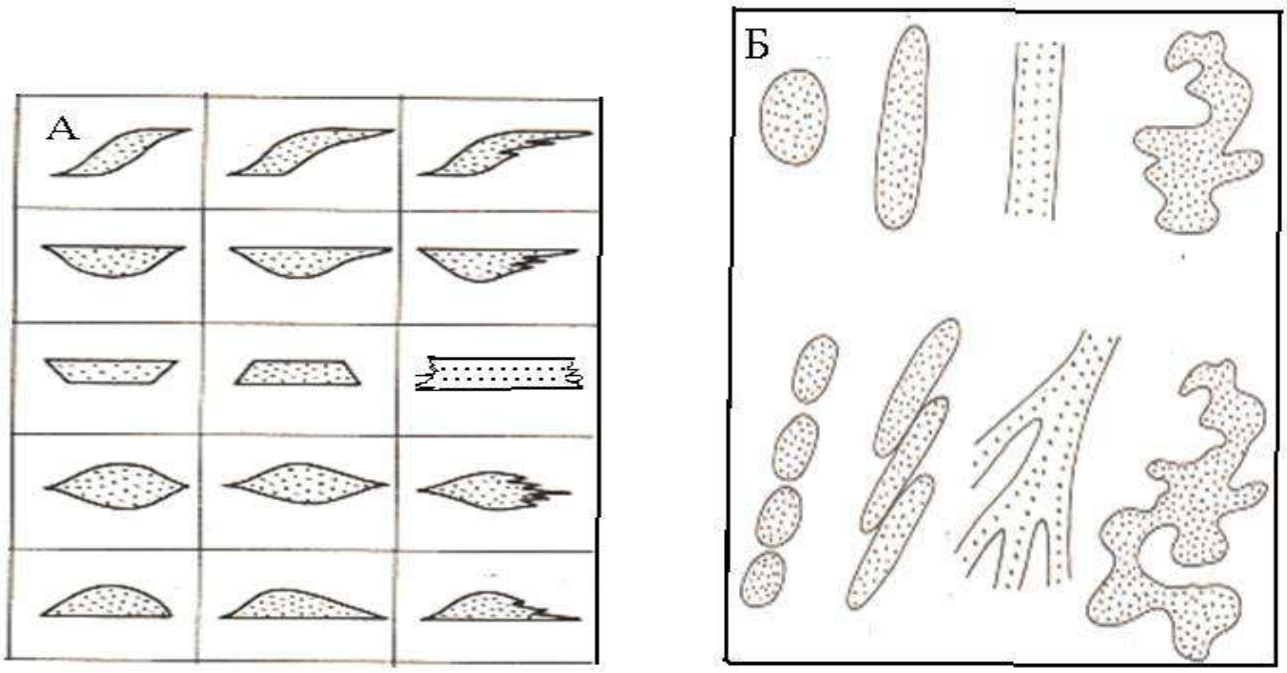


Рис. 1.4. Формы песчаных тел в поперечном сечении (А) и в плане (Б), типичные для прибрежного мелководья и шельфа (В. С. Муромцев)

Фации умеренно-глубоководных частей шельфа представлены в большей части глинистыми отложениями, которые играют роль покрышек высокого качества. Однако встречаются песчано-алевритовые, реже - грубообломочные породы, которые могут выполнять роль коллекторов.

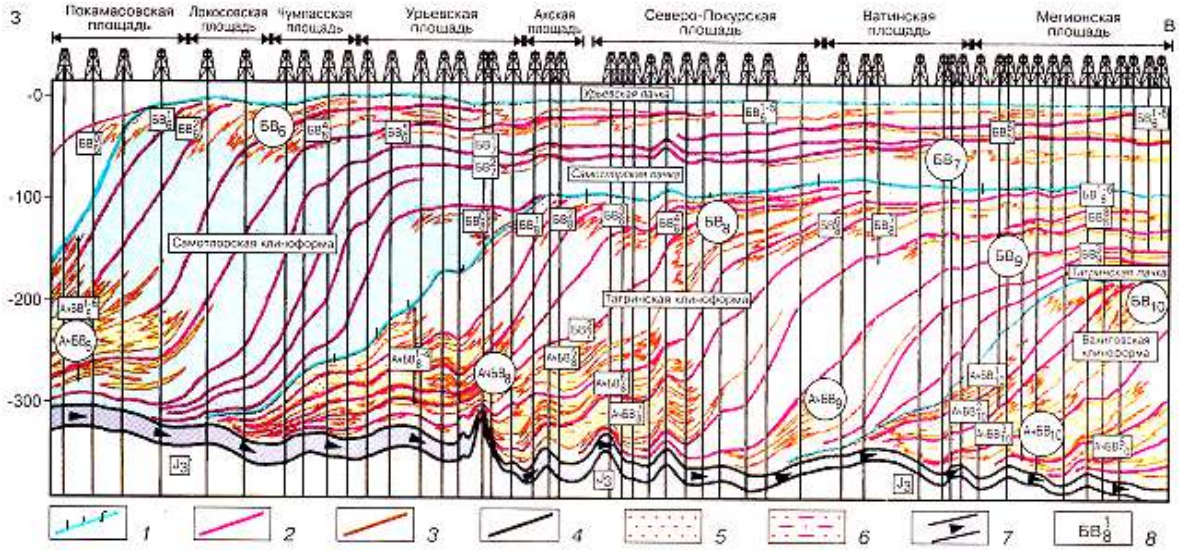


Рис.1.5. Принципиальная схема геологического строения западной части Нижневартовского свода (А. Л. Наумов)

1 -3 границы клиноформ; 4 = граница баженовской свиты; 5,6 – мелководные и глубоководные песчано-алевролитовые тела; 7 – битуминозные аргиллиты баженовской свиты; 8 – индексы продуктивных пластов

Часто при крутом погружении дна моря происходил сброс обломочных отложений с мелководья на глубину с образованием впоследствии песчаных тел, перекрытых известково-алевролитовым материалом. При этом происходило как перемещение берега, так и уровня моря. В результате формировались сложные тела, получившие название клиноформ, для которых характерны два уровня образования песчаников в одном линзообразно-вогнутом теле. Такие клиноформы типичны для многих месторождений Нижневартовского свода (Западная Сибирь) (рис. 1.5). При такой форме тел приходиться учитывать различный возраст образования песчаных отложений, обнаруженных на одной глубине и единый возраст для разноглубинных тел.

Среди континентальных фаций наиболее перспективны аллювиальные отложения, образованные палеореками. Русла древних рек, выполненные песчаными и песчано-галечниковами образованиями и перекрытые глинистыми отложениями пойм, представляют благоприятные сочетания для образования тел-коллекторов

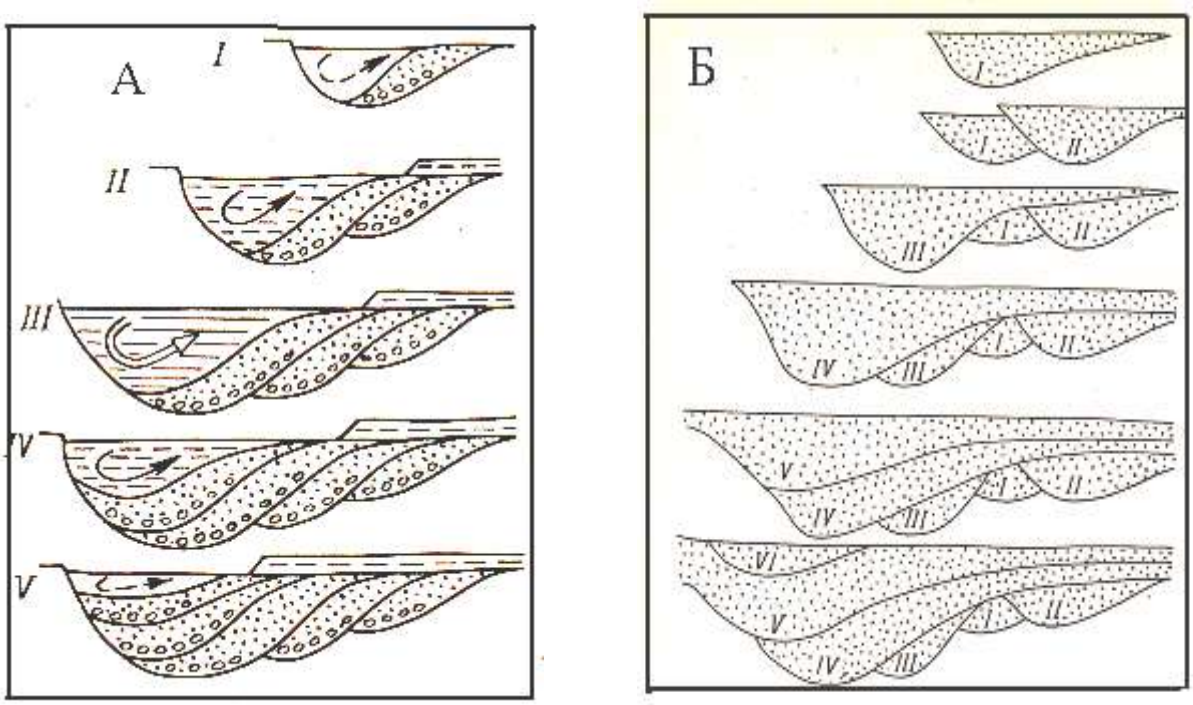


Рис. 1.6. Схемы последовательного формирования сегментов песчаных тел меандрирующей реки при различных гидродинамических и морфологических условиях

1- 1V – очерёдность образования песчаных тел (В. С. Муромцев)

В течение длительного (геологического) времени палеореки реагировали на изменение рельефа и климата, что находило отражение в морфологии, составе, строении песчаных и глинистых пород, выполнявших их долины. Образовывались простые и сложные формы русел с появлением серии наложенных песчаных тел у меандрирующих рек (рис.1.6).

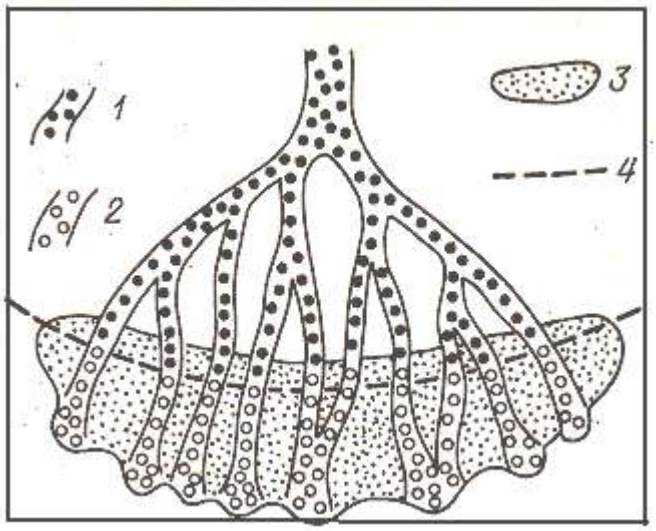


Рис. 1. 7. Схема расположения песчаных тел в пределах дельтового комплекса реки равнинного типа

1 - главные и боковые русла; 2 – подводные борозды; 3 - авидельта; 4 – морской край дельты

(В. С. Муромцев)

Многочисленные и сложные песчаные образования формировались в устьях палеорек. Дельтовый комплекс фаций включает фации нескольких групп со своими отличительными признаками: верхней и нижней равнины, морского края, подводного склона (авидельты). Упрощенная схема расположения песчаных тел дельтового комплекса показана на рис. 1.7.

Процессы осадкообразования протекают часто циклично с повторяемостью сочетаний разнотипных образований. Это связано с периодическими явлениями трангрессии (наступление моря на сушу) и регрессии (отступление моря). Цикличное строение осадочных толщ используется для выделения структурно-формационных этажей, ярусов и более детального их расчленения на группы и отдель-

ные фации. При этом возникают сложности, связанные с тем, что в континентальных, прибрежно-морских и дельтовых отложениях отдельные песчаные пласты не всегда выдержаны по простиранию, меняются по мощности, разветвляются (бифуркируют), выклиниваются и вновь появляются. Помогает построение схем последовательности залегания разновозрастных отложений, позволяющих установить условия осадконакопления, характерные для отдельного цикла, например при проявлении регрессии или трангрессии, и учитывать специфику формирования фаций. Так на схеме (рис.1.8) дана классификация участка разреза, для которого характерна цикличность в формировании морских и континентальных отложений при проявлении регрессии. Установлено, что на этом участке, где существовали условия мелководья, (глинистые отложения) начали формироваться песчаные тела авандельты, затем надводные фации, но впоследствии здесь снова восстановились условия мелководья.

Помогают выделить циклы формирования фаций литологические признаки отложений, а также формы аномалий на диаграммах геофизических методов исследования скважин и в первую очередь данные электрометрии. Более подробно этот вопрос рассмотрен ниже.

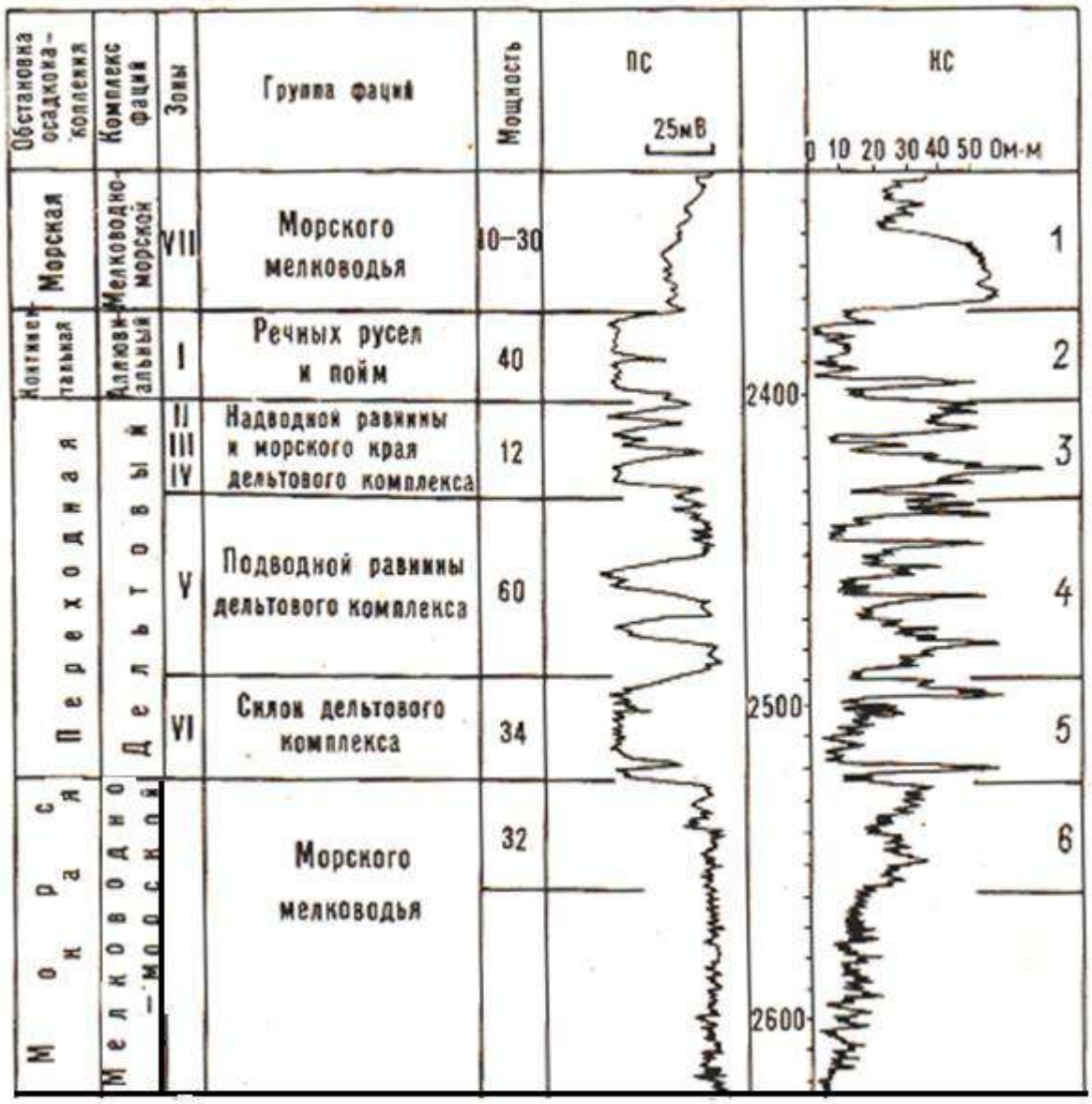


Рис. 1.8. Схема последовательности залегания группы фаций регресивного дельтового комплекса и их электрометрическая характеристика (В. С. Муромцев)

1.4. Природные резервуары, ловушки и залежи нефти и газа

Подземные скопления нефти и газа содержатся в так называемых *природных резервуарах*. Ими именуются пласты, толщи и массивы пористых и проницаемых для нефти и газа пород-коллекторов, которые частично или со всех сторон ограничены практически

непроницаемыми породами. Природные резервуары образованы песчано-алевролитовыми, карбонатными, а в некоторых случаях изменёнными магматическими породами. Различают три основных их типа: пластовые, массивные и литологически ограниченные резервуары.

Непроницаемые толщи (флюидоэкраны) сложены преимущественно глинистыми, сульфатными, соленосными породами, реже плотными карбонатными породами. Природные резервуары всегда в той или иной степени водонасыщенны.

Будучи легче воды, нефть и газ всплывают к кровле резервуара и скапливаются в его наиболее возвышенных местах. Часть природного резервуара, в которой существуют застойные условия для подвижных флюидов, то-есть устанавливается равновесие между силами, вызывающими перемещение флюидов и препятствующими им, называется *ловушкой*. В ловушках создаются благоприятные условия для накопления нефти и газа.

Различают несколько типов ловушек:

структурные, образованные в результате изгиба слоёв (сводовые) или нарушения их сплошности (тектонически экранированные);

стратиграфические, когда близкие по литологии толщи разделены поверхностью несогласия;

литологические, сформированные в результате выклинивания песчанистых пород в непроницаемых толщах,

погребённых массивов с участками высокопроницаемых пород (рифы, изменённые поднятия кристаллического фундамента).

Классификация ловушек близка к классификации залежей нефти и газа, поскольку УВ занимают часть или весь объём ловушки и имеют общие элементы строения.

Залежи нефти и газа представляют собой локальное скопление УВ в ловушке, т.е. её продуктивную часть. Совокупность залежей УВ образуют месторождение (газовое, нефтегазовое, нефтяное).

Газ, нефть и вода располагаются в ловушке в соответствии с их плотностью. Поверхности контакта газа и нефти, воды и нефти называются поверхностями газонефтяного (ГНК) и водонефтяного (ВНК) контактами соответственно (рис. 1.9 А). Линии пересечения поверхности ВНК (ГНК) подошвы с поверхностью кровли продуктивного пласта представляет внешний контур нефтеносности (газоносности). Если поверхность контакта горизонтальна, то контур

нефтеносности (газоносности) в плане параллелен изогипсам кровли пласта. При наклонном положении поверхности ВНК (ГНК) на структурной карте контур нефтеносности (газоносности) будет пересекать изогипсы кровли, смещаясь в сторону наклона поверхности раздела.

Контакты между разнотипными флюидами могут быть не резкими из-за присутствия переходной зоны, в которой существует смесь флюидов. Например, в нефтенасыщенной части залежи с глубиной происходит её обеднение с увеличением доли воды.

Представление о примерах сосредоточения нефтегазовых залежей в некоторых типах ловушек даёт обобщение, приводимое на рис. 1.9.

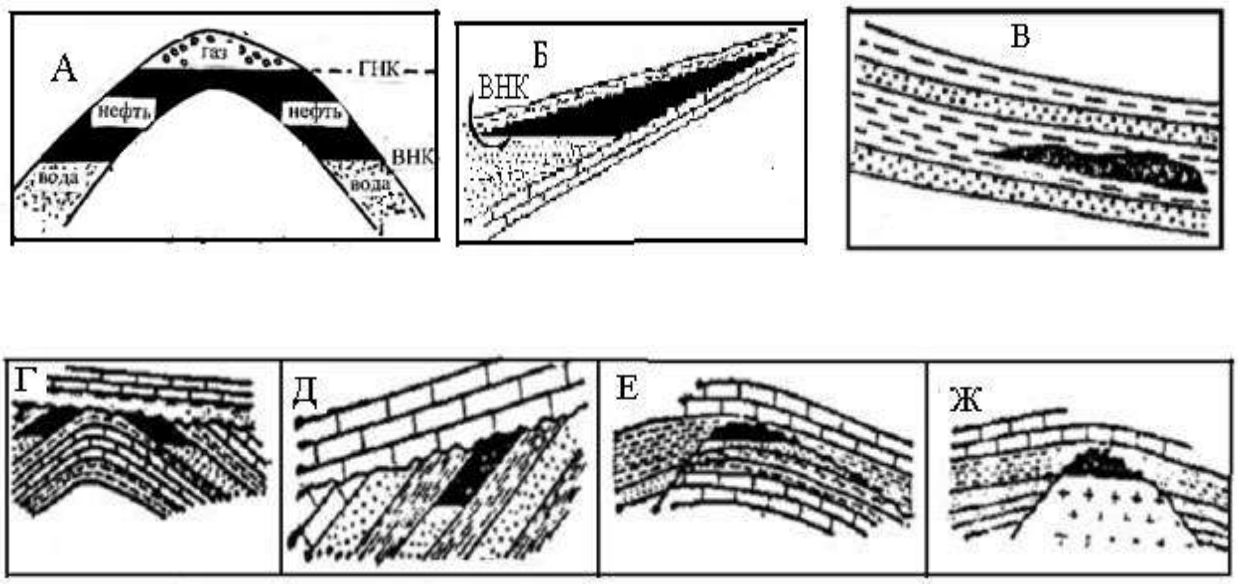


Рис. 1.9. Примеры типовых ловушек и нефтегазовых залежей
А – пластовая сводовая залежь в структурной ловушке (линейные антиклинали и брахиантиклинали) ; Б – Залежь в стратиграфическиой ловушке, образованной поверхностью несогласия; В – Залежь в литологической ловушке (выклинивание песков в глинах); Г,Д – пластовые залежи в стратиграфических ловушках (пласты-коллекторы срезаны эрозией и несогласно перекрыты молодыми непроницаемыми породами); Е - пластовые залежи, экранированные разрывом; Ж – массивные залежи в выступах (рифы, поднятия кристаллического фундамента) под сводовыми экранами

1.5 Исходные данные и этапы построения геолого-геофизической модели нефтегазовой залежи

Работа по созданию модели начинается со сбора данных на фиксированную дату, но впоследствии по мере поступления новых данных производится корректировка модели. Моделирование начинается с построения емкостной модели, затем на базе геолого-структурного и ёмкостного моделирования формируется фильтрационная модель, а завершаются построения созданием флюидно-динамической модели.

В моделировании принимают участие специалисты в различных областях знаний, так как решаются разноплановые задачи. Главными из них являются подсчёт запасов (емкостная модель), изучение распределения фильтрационных характеристик коллекторов с определением путей миграции флюидов и рационального размещения добывающих скважин (фильтрационная модель), исследование состава флюидальной системы и её термобарического состояния, знание которых необходимо для принятия правильных решений по нефтегазоизвлечению (флюидально-динамическая модель).

Ограничимся наиболее детальным рассмотрением процесса создания ёмкостной модели, при котором наибольший вклад вносят специалисты - геофизики, хотя их участие необходимо и при более углублённом геолого-математическом моделировании нефтегазовых залежей.

Материальной основой для моделирования являются данные ГИС, подкреплённые результатами ГТИ и исследований керна, по всем скважинам на площади природного резервуара. Эти данные, получаемые обычно для каждой скважины после завершения её бурения, включают конфигурацию и положение трассы скважины в пространстве, геологические колонки с выделенными пластами - коллекторами. В первую очередь для коллекторов определяются их эффективные толщины, характер насыщения, глинистость, остаточная водонасыщенность, плотность, пористости (общая, эффективная, динамическая), проницаемость. Для продуктивных пластов с раз-

ным характером насыщения определяют контакты участков с разными флюидами (ГНК, ГВК, ВНК), а также коэффициенты $К_г$, $К_н$ (или $К_{нг}$).

Стандартными составляющими процесса разведки и ГГМ являются данные сейсморазведки. Поэтому исходные материалы для моделирования включают разрезы времён отражения, полученные при проведении 3D или 2D сейсморазведки с привязкой к скважинам, результаты вертикального сейсмического профилирования (ВСП) по отдельным скважинам.

На первом этапе ГГМ по данным сейсморазведки создаётся структурная «толстослоистая» модель всего месторождения с отображением основных горизонтов. Полученные результаты представляют некоторый каркас структуры изучаемой среды. Полученные по данным ВСП характеристики средней скорости в разрезе, а также применение моделирования сейсмотрасс по скважинам и сопоставление их с сейсмотрассами полевой сейсморазведки, позволяет выполнить для волновых полей преобразование типа «время – глубина». Это позволяет на сейсмических разрезах определить глубины отражающих горизонтов и их соответствие границам пластов, выделяемых по данным ГИС.

С использованием глубинных сейсмических разрезов проводится детальная корреляция разрезов по данным ГИС. При этом уточняется литологическое расчленение разреза с определением флюидных контактов в пространстве. Завершение данной работы позволяет перейти к построению «тонкослоистого» модели месторождения в виде каркаса продуктивных пластов. Одной из важных задач является правильное стратиграфическое расчленение разрезов глубоких скважин. Как правило, выбирается в качестве эталона одна или несколько скважин, изученных наиболее детально, чьи стратиграфические разбивки переносятся на корреляционные разрезы. По корреляционным профильным разрезам, в первую очередь проложенным вкрест простирания осевых частей структуры изучаемого объекта, определяют принципиальные черты его геологического строения и историю формирования.

Совокупность собранных данных позволяет выявить пористое пространство в изучаемой среде, геометрические размеры продуктивных пластов и их насыщенность нефтью и газом. Эти размеры обычно определяют по структурной карте месторождения, на которой нанесены изогипсы какой – либо маркирующей поверхности пласта. Строятся также карты эффективных мощности ($h_{эф}$), общей и эффективной пористости ($К_п$, $К_{п\ эф}$), проницаемости ($К_{пр}$), коэффициентов нефтенасыщенности и газонасыщенности ($К_н$, $К_г$), линейных запасов по скважинам (произведений $h_{эф}К_пК_н$ ($h_{эф}$ $К_пК_г$)) и др. параметров. Эти данные позволяют вычислить объёмы пористых продуктивных пластов или их частей с различным характером насыщения, а также запасы нефти и газа. Для большей наглядности по отдельным профилям строят графики линейных запасов.

Процедура геометризации залежей нефти и газа может проводиться вручную или с применением компьютерных технологий.

Дальнейшая работа с моделью залежи предполагает участие геологов и гидродинамиков.

2.Использование сейсморазведки при изучении нефтегазовых резервуаров

2.1 Предпосылки применения сейсмических исследований при геолого-геофизическом моделировании

Объединение данных бурения, ГИС и сейсморазведки, получаемых в процессе разведки и разработки нефтегазовых залежей, позволяет повысить информативность исследований строения изучаемой геологической среды и в первую очередь продуктивных объектов. Достоинство сейсморазведки состоит в том, что с её помощью удаётся получить представление о распределении геологических и петрофизических границ во всём изучаемом объёме среды, хотя детальность этих исследований по глубине ограничена.

Для того чтобы данные полевой сейсморазведки можно было использовать для геологических построений они подвергаются специализированным системам обработки (многообразные варианты

фильтрации, введение поправок во времена и амплитуды колебаний и др.). В результате строят сейсмические разрезы и кубы, на которых приводятся волновые изображения среды в виде отражающих горизонтов с отображением погрешности обработки (рис. 1.1).

Сейсмические трассы могут располагаться между скважинами, что способствует более достоверному решению задач корреляции и, следовательно, успешному геолого-геофизическому моделированию залежей.

Сейсмические трассы, получаемые в результате обработки полевых данных, состоят только из волн, образовавшихся в результате отражения от последовательности геологических границ. На рис. 2.1 представлена простейшая модель пласта (с покрывающей и подстилающей средами), толщина которого больше длины падающей импульсной сейсмической волны. В этом случае возникают раздельные отражённые волны от кровли и подошвы пласта, а времена их возвращения на дневную поверхность характеризуют глубину этих границ

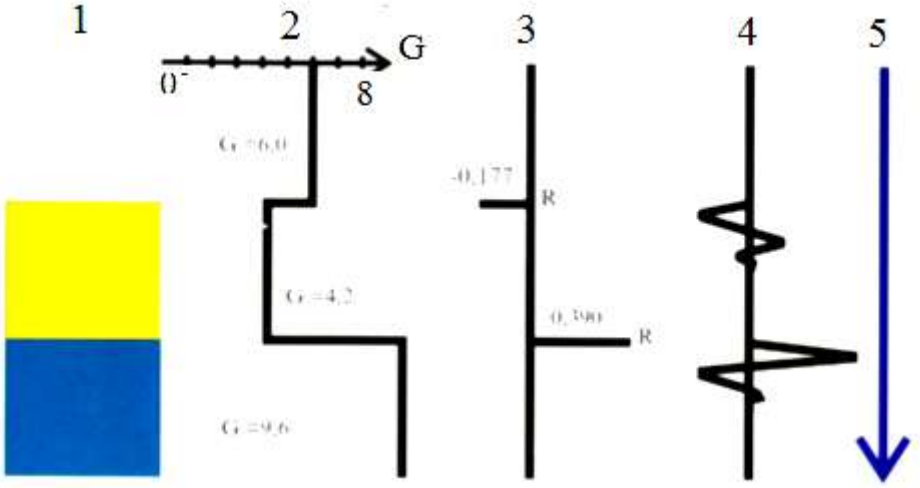


Рис. 2.1. Модель трёхслойной среды с различными величинами импеданса (G), коэффициентами отражения (R) и отражёнными волнами, соответствующими границам слоев
1 – трёхслойная среда; 2 - график G ; 3 - величины R на границах слоёв; 4 - отражённые волны; 5 – шкала времени

Как и в натуре, каждый слой пород характеризуется плотностью (σ г/см^3) и скоростью (V км/с), а также сейсмическим импедансом G=σ·V. В примере, иллюстрируемым рис.2.1, слои характеризуются

сверху вниз по плотности значениями 1,8, 2,05 и 2,4 г/см^3, а по скорости значениями 2,3, 2,42 и 4 км/с.

Амплитуды отражений определяются величинам коэффициентов отражения R от соответствующих границ. Если контактируют слои i и i+1, залегающие выше и ниже границы, то для границы

$$R_i = (G_{i+1} - G_i)/(G_{i+1} - G_i). \quad (2.1)$$

Как следует из формулы (2.1) коэффициенты отражения и соответствующие им амплитуды отражения могут быть положительными и отрицательными. Так в рассматриваемом примере слоистой среды величины R имеют значения – 0,177 и 0,39.

2.2 Интерпретация сейсмических данных

Знание распределения коэффициентов отражения по глубине (по данным ГИС для одной из скважин) позволяет построить синтетическую сейсмическую трассу, с амплитудами соответствующими коэффициентам отражения. Это позволяет сопоставить её с реальной сейсмической трассой на профиле, проходящем через скважину, по которой выполнен каротаж методами ГГК и АК, и преобразовать временной сейсмический разрез в глубинный разрез. Пример выполнения привязки временного разреза к глубине изученной каротажем скважины путем сопоставления синтетической и реальной сейсмограмм приведён на рис. 2.2.

Следует только учитывать, что толщины изучаемых геологических пластов в разрезе могут быть меньше чем длины сейсмических волн (на больших глубинах это 200 – 300 м). Проблема вертикального разрешения заключается в возможности оценки временной задержки между двумя импульсами отраженными от кровли и подошвы слоя, когда из – за малой мощности этого слоя импульсы интерферируют, образуя общий импульс сложной формы. Вертикальное разрешение оценивается по отношению к видимой длине волны.

Поэтому сейсмическая трасса представляет не последовательность разделённых во времени отражённых волн, но возможно результат наложения таких волн друг на друга. В связи с этим явлением при определении и прослеживании границ отражающих горизонтов на волновых полях целесообразно ориентироваться на точки смены полярности волновых импульсов, как это показано на рис. 2.3.

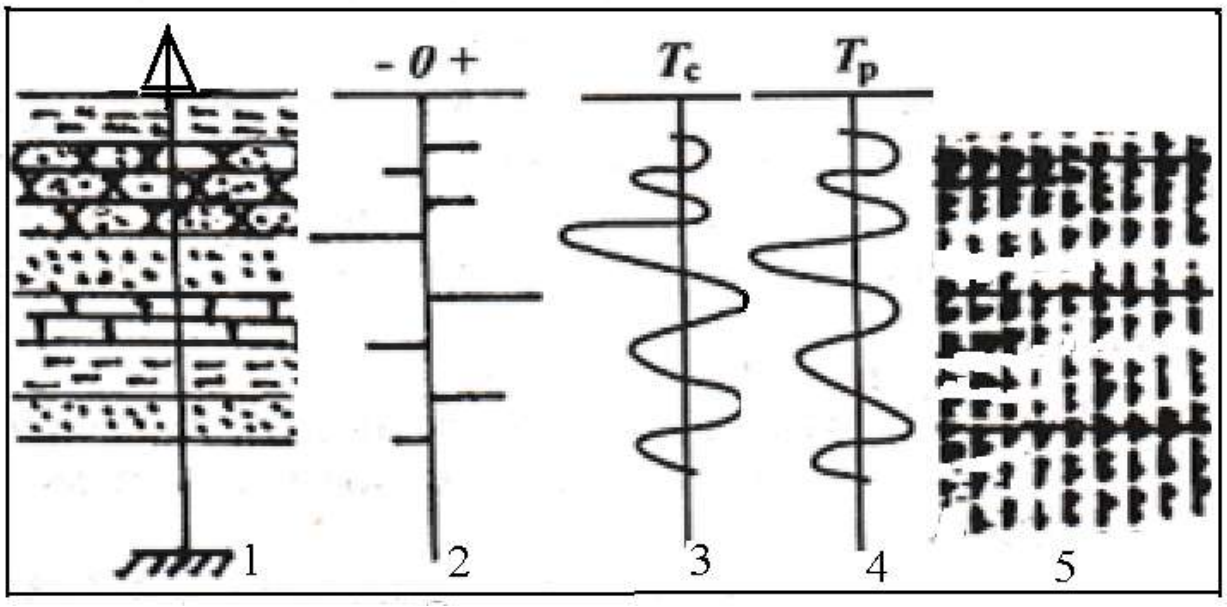


Рис. 2.2. Пример сопоставления данных изучения разреза по скважине с сейсмическим разрезом, позволяющим использовать последний для геолого-геофизического моделирования нефтяной залежи

1 – скважина с известным геологическим разрезом; 2 – графическое представление коэффициентов отражения; 3 – синтетическая трасса по скважине; 4 – сейсмическая трасса, совпадающая со скважиной; 5 – фрагмент временного сейсмического разреза, проходящего через скважину, сопоставленный со скважиной (по В. В. Стрельченко)

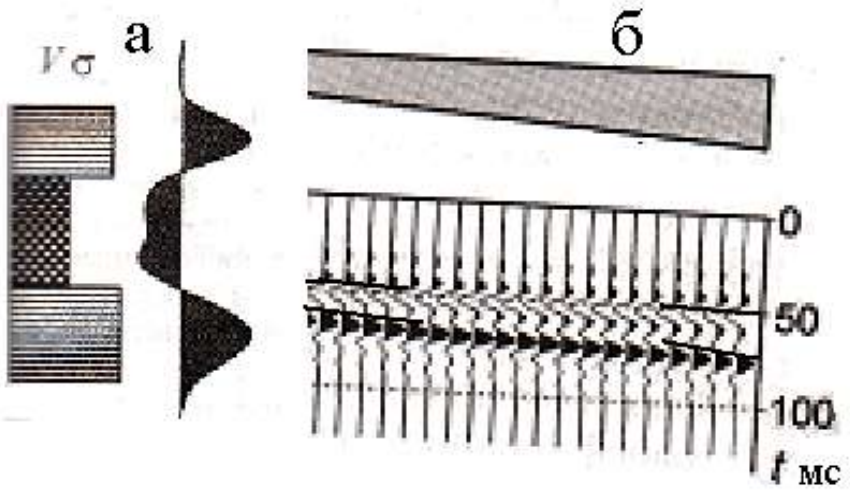


Рис. 2.3. Примеры выделения границ слоев с различными упругими свойствами по одной сейсмотрассе (а) и их совокупности (б) (по Ю. Н. Воскресенскому)

Для преобразования временных сейсмических разрезов в глубинные разрезы используют данные вертикального сейсмического профилирования (ВСП), проводимого по одной или нескольким скважинам, вскрывшим изучаемый нефтегазовый резервуар. При

ВСП устанавливается соотношение: время пробега волн – глубина в точках скважины. Суть метода иллюстрирует рис. 2.4. Данные ВСП помогают не только более точно привязать временные разрезы полевой сейсморазведки к глубинам скважин, но и получить изображение отражающих горизонтов в околоскважинном пространстве (рис. 2.4 б).

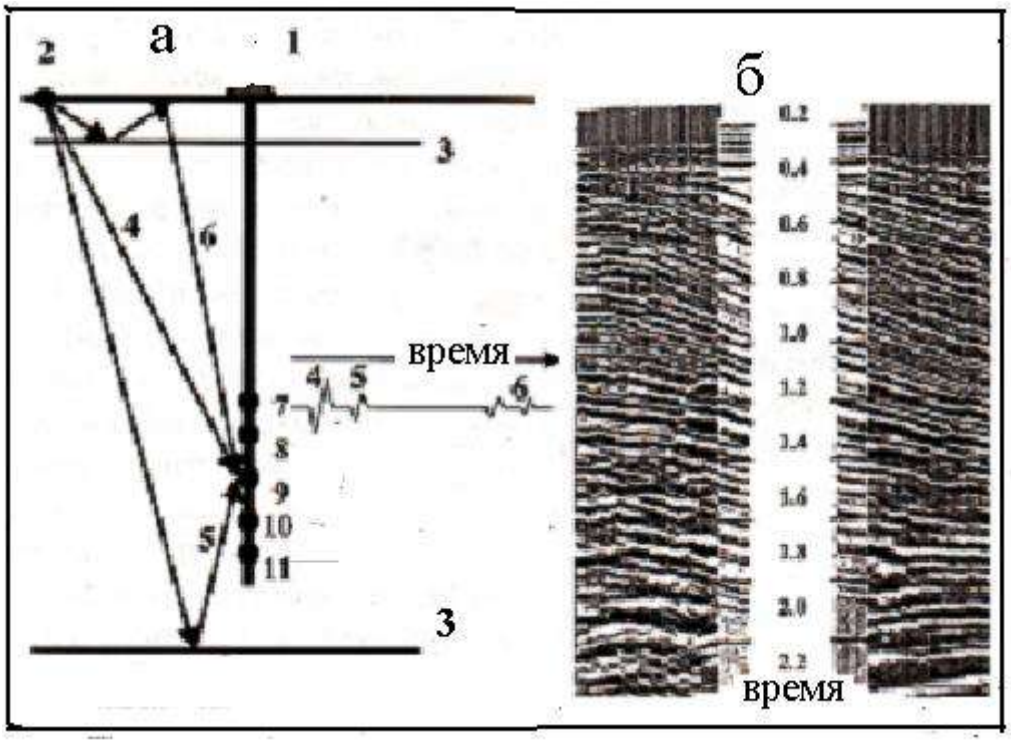


Рис. 2.4 Принцип проведения ВСП (а) и разрез волновой картины, получаемый при этом (б)

1 – скважина; 2 – источник на левом луче на земной поверхности; 3 – отражающие границы; 4 – прямая волна; 5 - отражённая восходящая волна; 6 – отражённая нисходящая волна;7 – 11 регистрирующие датчики и одна из сейсмограмм

Одна из главных решаемых задач при проведении ВСП - это определение зависимости средней скорости $V_{ср}$ от глубины H. Для этого строится продольный вертикальный годограф $t(H)$, пример которого показан на рис. 2 .5. На нем выделяют интервалы, с одинаковым градиентом, которые соответствуют однородным по свойствам пластам. Далее определяют пластовую скорость $V_{пл} = \Delta H/\Delta t$ и среднюю скорость в покрывающей толще $V_{ср} = H/t$.

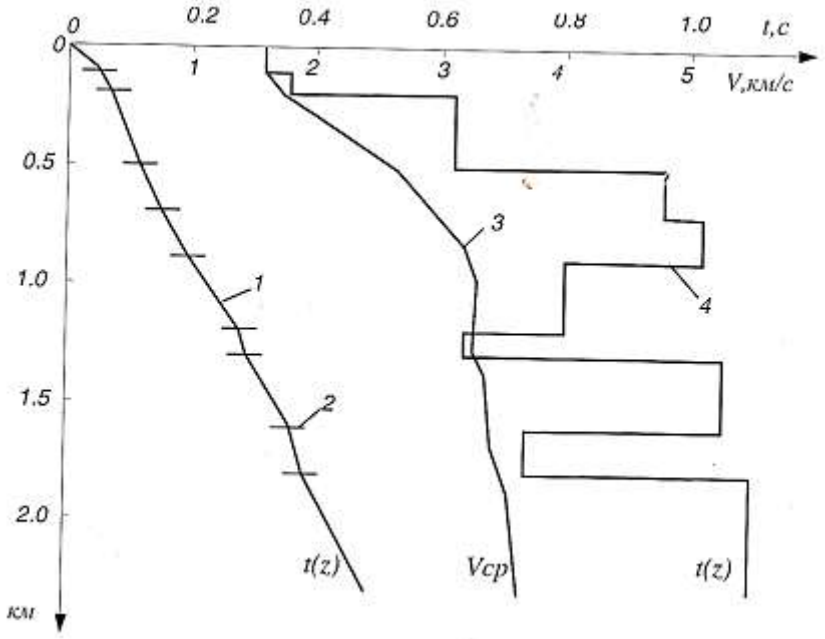


Рис. 2. 5. Пример использования вертикального годографа (1) с выделенными на нем границами пластов (2) для построения зависимости средней скорости от глубины *z~H* (3) и определения графика пластовой скорости (4)

В полевой сейсморазведке преобразование временного разреза в глубинный разрез в общем случае предполагает проведение сложной математической процедуры - миграции. Однако, используя график средних скоростей ($V_{ср}$), полученный при ВСП или вычисленный по данным ГИС, шкалу глубин (H) для совпадающей со скважиной трассы временного разреза полевой сейсморазведки с учётом двойного времени (t) прихода волны от источника к приёмнику, можно приблизительно оценить по формуле

$$H=\sqrt{(tV)^2 - x^2}/2, \qquad (2.2)$$

где x – расстояние от источника до скважины. При больших глубинах для определения H используют приближённую зависимость:

$$H\approx tV/2. \qquad (2.3)$$

Крупномасштабная детальная сейсморазведка во многих случаях фиксирует структурные особенности изучаемых нефтегазовых резервуаров. Пример фрагмента временного разреза на одном из таких объектов в интервале 1,3 – 1,6 с. приведен на рис. 2.6. На разрезе в интервале 1,3 – 1,4 с. коррелируемыми волнами с положительной

амплитудой фиксируется куполовидная кровля толщи песчаников, под экраном из глинистых отложений. Резервуар углеводородов в песчаных породах разделяется на газо и нефтенасыщенные части. Газонфтяной контакт, ниже которого породы имеют более высокий сейсмический импеданс, отчетливо фиксируется положительными амплитудами волн на уровне времени 1,4 с. В совокупности данные этого сейсмического временного разреза после определения масштаба глубин позволяют построить каркас нефтегазового резервуара по профилю.

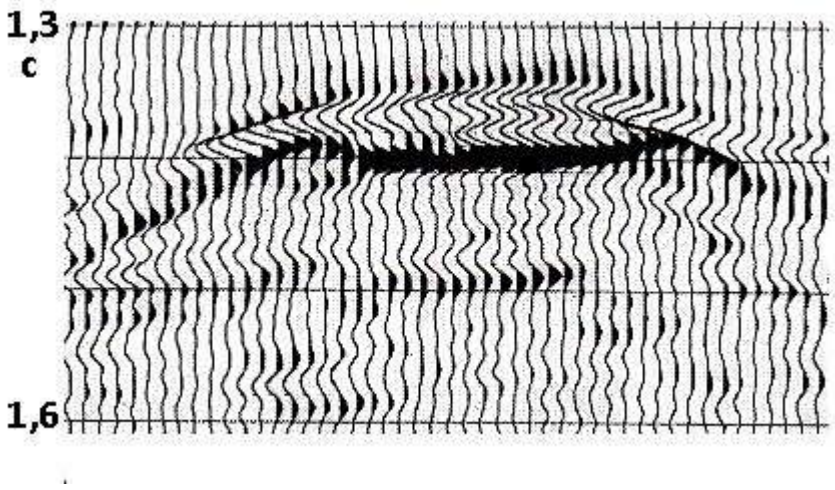


Рис. 2.6. Фрагмент временного сейсмического разреза по профилю проходящему над газонефтеносной залежью [5]

Глубинные сейсмические разрезы, полученные в результате преобразования шкалы времени в шкалу глубин, используются при решении следующих задач:
- корреляция пластов в межскважинном пространстве;
- выявление и тассирование тектонических нарушений
- картирование поверхностей коллекторов;
- уточнение пространственных контуров залежей.

2.3. Корреляция сейсмических горизонтов, выявление тектонических нарушений

Корреляция заключается в прослеживании одного и того же отражающего горизонта по площади сейсмических исследований. Эта

процедура может выполняться в автоматическом или ручном режиме. Используются совокупности признаков сходства сигналов, проявляющиеся на соседних сейсмических трассах. Корреляция начинается с прослеживания опорных отражений, наиболее устойчивых на учас- тке исследований. Часто такими опорными горизонтами служат контакты плотных пород (плотные песчаники, известняки и др.) с рыхлыми глинами. Для менее выраженных горизонтов признаки корреляции могут нарушаться по геологическим признакам (изменение литологического состава пород, плавного выклинивания), за счёт разломов, а также вследствие вариаций толщин пластов внутри отражающей пачки. И хотя сейсмические разрезы в случае малой мощности слоёв могут по глубине не идеально совпадать с геологическими границами, они помогают установить главные закономерности в пространственном размещении большинства пластов и в первую очередь продуктивных коллекторов.

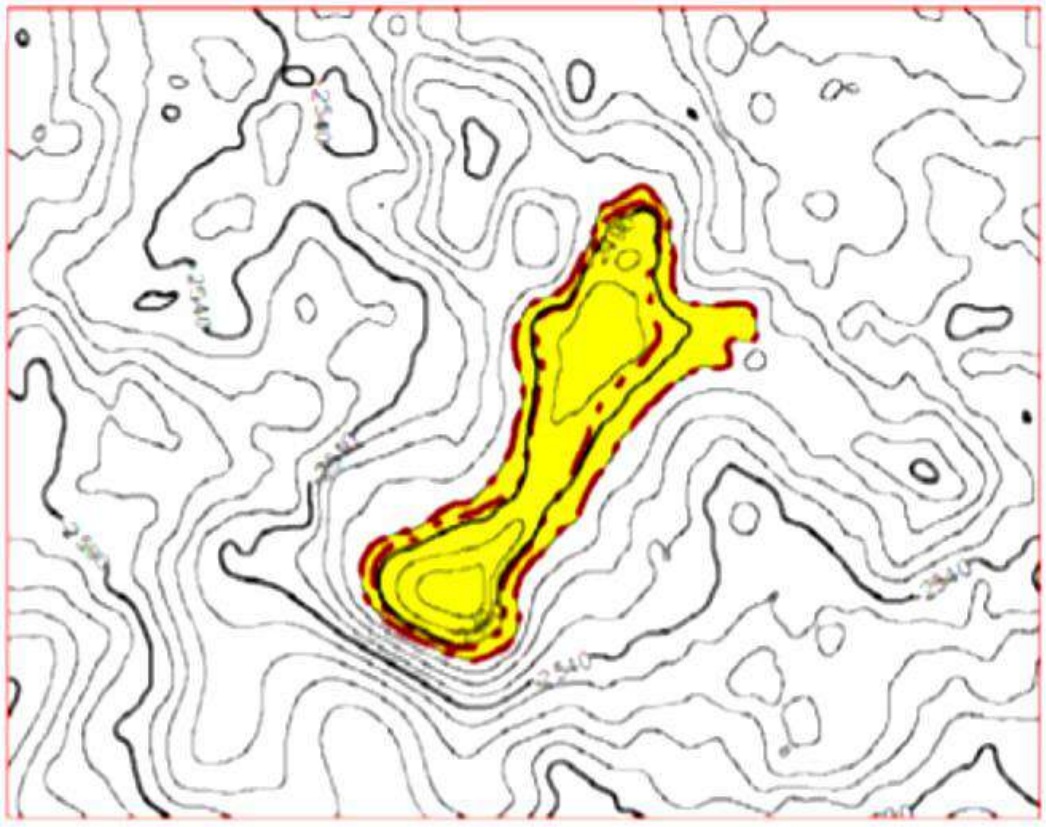


Рис. 2.6. Пример структурной карты по кровле опорного отражающего сейсмического горизонта (изолинии равных глубин кровли проведены через 10 м.) с выделенным по данным ГИС контуром залежи

Тектонические нарушения выявляют по наличию в волновом поле закономерно расположенных субвертикально ориентированных нарушений плавности в корреляции сигналов между соседними трассами, изменения времён, формы и интенсивности колебаний для отражённых волн. Примеры проявления разрывных нарушений в волновом поле можно наблюдать на рис. 1. 1.

Результаты определения положения на сейсмических профилях опорных отражающих горизонтов позволяют строить структурные карты для этих горизонтов, которые могут быть более детальными, чем структурные карты, построенные по данным ГИС. Первоочередной интерес представляют структурные карты кровли и подошвы продуктивных отложений, а также карты их мощностей. Полученные карты используют для корректировки карт данных ГИС. Пример построения по опорному горизонту структурной карты, отражающей сводовый характер изучаемого нефтегазового месторождения, показан на рис. 2.6.

2.4. Сейсмические оценки изменения свойств резервуаров в период их разработки

2.4. Сейсмические оценки изменения свойств резервуаров в период их разработки

В настоящее время применение сейсморазведки не ограничивается поисково – разведочными работами. Широко используется сейсмическая крупномасштабная съемка на разрабатываемых нефтегазовых месторождениях. Высокая разрешающая способность современных технологий позволяет фиксировать изменения свойств изучаемых объектов, связанных с извлечением углеводородов. Успехи сейсмического мониторинга резервуаров нефти и газа позволил ввести в обращение термин 4*D* сейсморазведка, в котором подчеркивается использование четвертого измерения, каким является календарное время.

Передвижение флюидов в резервуаре в процессе эксплуатации приводит к изменению упругих свойств и плотности пород, связанных с замещением одних флюидов другими. Со временем изменяются в пространстве положения газо-нефтяного водо – нефтяного контактов внутри резервуаров. Это приводит к изменению распределения акустических свойств пород, что позволяет зафиксировать эти

эффекты сейсморазведкой и использовать при изучении состояния углеводородосодержащих толщ.

Принцип использования измерений 4*D* сейсморазведки демонАмотрасс на уровне нефтяного пласта , зарегистрированные при одном положении системы наблюдений, но в существенно разное время. Изменение мощности нефтенасыщенного пласта после начала добычи привело к изменению сейсмотрасс по амплитудам δA и временным сдвигам δ*t*. По этим изменениям, относимые к новым сейсмическим атрибутам делаются заключения о современном состоянии нефтенасыщенности продуктивного участка исследуемого пласта. Разностные данные амплитуд и времен, на разрезах и планах в совокупности с данными ГИС позволяют контролировать оценивать оставшиеся запасы углеводородов, следить за изменением во времени контуров нефтегазонасыщенности в сравнении с исходными сведениями. Пример регистрации изменения контура нефтенасыщенности со временем приведен на рис. 2.6.

2.4. Сейсмические оценки изменения свойств резервуаров в период их разработки

В настоящее время применение сейсморазведки не ограничивается поисково – разведочными работами. Широко используется сейсмическая крупномасштабная съемка на разрабатываемых нефтегазовых месторождениях. Высокая разрешающая способность современных технологий позволяет фиксировать изменения свойств изучаемых объектов, связанных с извлечением углеводородов. Успехи сейсмического мониторинга резервуаров нефти и газа позволил ввести в обращение термин 4*D* сейсморазведка, в котором подчеркивается использование четвертого измерения, каким является календарное время.

Передвижение флюидов в резервуаре в процессе эксплуатации приводит к изменению упругих свойств и плотности пород, связанных с замещением одних флюидов другими. Со временем изменяются в пространстве положения газо-нефтяного водо – нефтяного контактов внутри резервуаров. Это приводит к изменению распределения акустических свойств пород, что позволяет зафиксировать эти эффекты сейсморазведкой и использовать при изучении состояния углеводородосодержащих толщ.

Принцип использования измерений 4*D* сейсморазведки демонАмотрасс на уровне нефтяного пласта , зарегистрированные при одном положении системы наблюдений, но в существенно разное время. Изменение мощности нефтенасыщенного пласта после начала добычи привело к изменению сейсмотрасс по амплитудам δA и временным сдвигам δ*t*. По этим изменениям, относимые к новым сейсмическим атрибутам делаются заключения о современном состоянии нефтенасыщенности продуктивного участка исследуемого пласта. Разностные данные амплитуд и времен, на разрезах и планах в совокупности с данными ГИС позволяют контролировать оценивать оставшиеся запасы углеводородов, следить за изменением во времени контуров нефтегазонасыщенности в сравнении с исходными сведениями. Пример регистрации изменения контура нефтенасыщенности со временем приведен на рис. 2.6.

3. Использование данных ГИС при формировании геолого-геофизической модели залежи нефти и газа

3.1. Данные ГИС по отдельным скважинам

Для построения геолого-гефизической модели залежи нефти и газа используют результаты интерпретации данных ГИС по скважинам площади, включающей контур залежи. Необходимо иметь геологические колонки с выделением заведомо глинистых пород (высокие значения на диаграммах ГК, ПС, электропроводности). Обычно легко диагностируются плотные малопористые породы типа карбонатов, плотных песчаников (высокие величины плотности по ГГК, УЭС, нейтронных свойств, низкие – естественной радиоактивности, интервального времени). Особый интерес представляет выделение коллекторов, для которых должны быть определены их фильтрационно-емкостные свойства (ФЕС), характер и степень насыщения флюидами.

Выделение коллекторов производится по следующим признакам:

- наличие глинистой корочки (по уменьшению диаметра скважины) на кривой кавернометрии;

- существование радиального градиента сопротивлений, измеренного методами с разной глубиной исследования зондов (МКЗ, МБК, стантартные ПЗ и ГЗ, БК, ВИКИЗ или БКЗ, ИК);
- проявления аномалий, характерных для пористых, малоглинистых и проницаемых пород, на диаграммах методов ПС, ГК, НК, АК, ЯМК.

При этом могут быть использованы установленные по изучениям керна и испытаний скважин и на основе опыта измерений в скважинах предельные граничные значения, определяемых при ГИС параметров для разделения горных пород на «коллектор – неколлектор» также, как это выполняется для разделения по характеру насыщения (см. рис. 3.1). Как правило, применяют несколько количественных критериев.

Для характеристики горных пород с признаками коллекторов определяют коэффициенты общей пористости ($К_п$), эффективной пористости ($К_{п\ эфф}$), проницаемости ($К_{пр}$), по значениям которых принимается решение об отнесении горной породы к классу «коллектор» или «неколлектор».

Величины $К_п$ определяют обычно несколькими способами, контролирующими и уточняющими друг друга. Например, по измерениям плотности пород (σ) в терригенном разрезе с преобладанием в скелете кварца и наличии глинистых минералов близких по плотности кварцу (σ=2,65 г/см^3) $К_п$ можно вычислить по формуле

$$К_п(\%)=160,6-60,6\sigma(г/см^3). \quad (3.1)$$

Пористость чистых песчаников отождествляют с пористостью матрицы ($К_{пм}$) и определяют её по скважинным измерениям или по статистическим зависимостям от глубины Н. Так для месторождений нефти и газа при терригенном разрезе в З.Сибири Д. А. Кожевников установил зависимость $К_{пм}$ (%)=42,5-7,5Н (км).

Эффективная пористость зависит от доли остаточной воды в поровом пространстве коллектора:

$$К_{п\ эфф} = К_п(1-К_{во}). \quad (3.2)$$

Коэффициент остаточной водонасыщенности обычно определяют по статистическим зависимостям $К_{во}(К_п)$, установленным для конкретной продуктивной залежи по результатам лабораторных измерений керна. Согласно исследованиям В. Н. Боганика для относительно неглубоко залегающих коллекторов З. Сибири справедливо

$$К_{во}=0{,}084 / К_{п\ (д.е.)}-0.18 \qquad (3.3)$$

Установленно (Д. А. Кожевников), что остаточная водонасыщенность обладает свойством инвариантености, и при известной величине петрофизического инварианта ψ рекомендована модель, учитывающая глубину горной породы,

$$К_{во}=(\mu_0/К_{пм})^{\psi}, \qquad (3.4)$$

где μ_0 – доля остаточной воды, связанной со скелетом коллектора. Для условий З.Сибири можно принять $\psi=1\text{-}1{,}43(К_{пм}- К_п)/К_{пм}$ (Кожевников Д. А., Сапожников В. М.). Тогда, например, для глубины 3 км, где $К_{пм} \approx 0{,}2$ при $К_п=0{,}15$ и для $\mu_0=0{,}05$ (типичная величина) по (3.4) получим $К_{во}=0{,}41$. По опыту практики это значение ближе к реальной характеристике, чем значение 0,38, получаемое по (3.3).

Для подавляющего большинства коллекторов по Д. А. Кожевникову и К. В. Коваленко зависимость коэффициента абсолютной проницаемости $К_{пр}$ (в $фм^2$) от $К_{п\ эф}$ (в %) в полулогарифмическом масштабе линейна:

$$\lg К_{пр} =0{,}22\ К_{п\ эф}-1. \qquad (3.5)$$

Величина $К_{пр}$ используется для характеристики фильтрационных свойств коллектора и, как будет показано ниже, при оценке средних размеров зёрен скелета.

Оценка характера насыщения коллекторов включает их разделение на водоносные и нефтегазосодержащие. Разграничение проводят по значениям УЭС, измеренного зондами с большим радиусом исследования (БК, ИК, ВИКИЗ). Для этого строят графики накопленной частости проявления нефтегазонасыщения и водонасыщения при конкретных значениях УЭС (для водонасыщенных коллекторов накопления частости проводят в направлении уменьшения УЭС). По накопленным частостям определяют граничные значения или

интервалы УЭС, выше которых коллектор с большой вероятностью может считаться нефтегазосодержащим, а при меньших значениях – водоносным. На рис. 3.1 значение 8 Ом м, при котором отмечается пересечение графиков накопленной частости, может быть принят граничным для разделения коллекторов на водоносные (меньше 8 Ом м) и нефтенасыщенные. С учётом треугольника ошибок надёжность выделения нефтенасыщенных пластов 97%. При сопротивлении ниже 6 Ом м коллектор заведомо водоносный.

При сложной структуре коллектора с прослоями глинистых или плотных пород определяется эффективная толщина нефтегазонасыщения как разность между общей толщиной коллектора и суммарной величиной непроницаемых прослоев. Для вычисления коэффициента нефтегазонасыщения $К_{нг}$ необходимо знать параметр насыщения $Р_н$, показывающий во сколько раз УЭС продуктивного пласта $\rho_{нг}$ больше УЭС водоносного пласта $\rho_{вп}$ такой же пористости. Тогда в общем случае по упрощённой формуле

$$К_{нг} = 1 - 1/\sqrt{Р_н}, \quad (3.1)$$

однако при наличии дополнительных исследований этот алгоритм может быть уточнён.

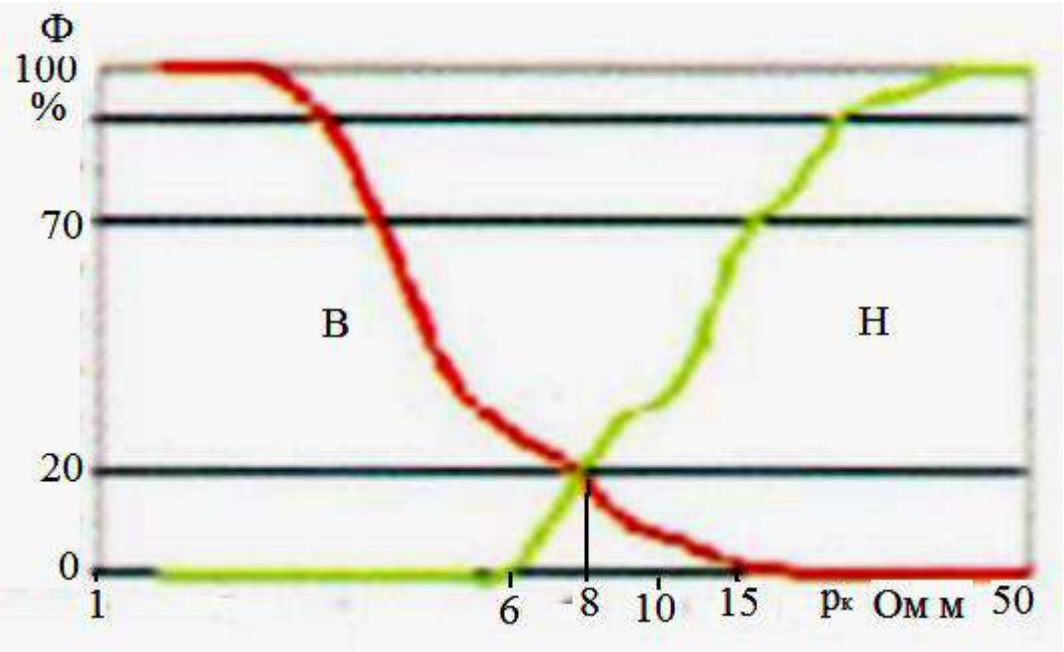


Рис. 3.1. Пример построения графиков интегральных функций распределения (Ф) параметра сопротивления, характерного для водоносных и нефтенасыщенных пластов, по которым осуществляется разделение их на эти классы; основание треугольника ошибок 6 – 15 Ом м

Разделение газонасыщенных и нефтенасыщенных интервалов коллектора производят по признакам индивидальным для каждой залежи. Часто первые характеризуются более высокими сопротивлениями, специфическими аномалиями газового каротажа, диагонсцируются по данным исследования керна, результатов испытаний. Правильность характера флюидальной насыщенности продуктивных коллекторов подтверждают по данным применения НК в обсаженных скважинах. На диаграммах НК газонасыщенные коллекторы имеют заметно большие значения по сравнению с нефтенасыщенными коллекторами. Те же в свою очередь отличаются более высокими показаниями от водоносных коллекторов. В открытом же стволе разграничить коллекторы с одинаковой пористой, но насыщенных различными флюидами по данным ГИС удается по данным ИК при мощности слоя больше 4 м. Маломощные пласты классифицируются неоднозначно. Малоизвестный способ рассмотрен в разделе 6.

Результаты определения положения на сейсмических профилях опорных отражающих горизонтов позволяют строить структурные карты для этих горизонтов, которые могут быть более детальными, чем структурные карты, построенные по данным ГИС. Первоочередной интерес представляют структурные карты кровли и подошвы продуктивных отложений, а также карты их мощностей. Полученные карты используют для корректировки карт данных ГИС. Пример построения по опорному горизонту структурной карты, отражающей сводовый характер изучаемого нефтегазового месторождения, показан на рис. 2.6.

3.2. Подготовка данных ГИС для интерпретации сейсморазведки

По скважинам, находящимся на сейсмических профилях и в первую очередь по тем из них, в которых выполнено ВСП, проводят дополнительную интерпретацию данных ГИС. Цель – уточнение привязки сейсмических отражающих горизонтов к геологическому

разрезу, привязка временных разрезов к продуктивным горизонтам. По этим скважинам должны быть выполнены измерения методами АК и ГГК. Используемые при этом диаграммы плотности (σ) и интервального времени (ΔТ) должны охарактеризовать не только пласты – коллекторы, но и другие слои с контрастным изменением физических свойств, которые рассматриваются как опорные горизонты. К ним относятся прослои плотных пород, глины и др. Обработка кривых заключается в расчленении разреза на прослои, отличающиеся по показаниям друг от друга не менее чем на 20% и по толщине должны быть не менее, чем 5 – 6 м. Могут быть выделены и прослои меньшей толщины (1- 2 м), если они резко отличаются по показаниям от окружающих пород и встречены в нескольких скважинах. По кривым ΔТ определяют пластовую скорость $V_{пл}$.

По результатам обработки диаграмм строятся графики сейсмического импеданса ($G=\sigma \cdot V_{пл}$), коэффициента отражения R и синтетическая трасса (см. рис. 2.1 и 2.2). При наличии данных ВСП для скважины приводится график средней скорости V. Значения V используются для определения глубины залегания отражающих горизонтов на временных сейсмических разрезах по формулам (2.2) или (2.3). Обычно рядом с шкалой времени прихода отраженных волн в мс. строится шкала глубин в м. Контроль за соответствием шкал производится с ориентировкой на синтетические трассы по скважинам.

Это позволяет использовать глубинные сейсмические разрезы при построении геологических разрезов по данным ГИС.

3.3 Корреляция разрезов скважин

Корреляция разрезов скважин является основным методом изучения внутреннего строения недр. На месторождениях в первую очередь представляет интерес выделение и прослеживание в геологической среде пластов-коллекторов и непроницаемых слоев, играющих роль флюидоэкранов, и вклинивавшихся между проницаемыми породами.

Корреляция делится на литологическую и стратиграфическую, которые взаимосвязаны. Уже на ранней стадии разведки формируются типовой или сводный геолого-геофизические разрезы. При корреляции обычно опираются на типовой (осреднённый) разрез, на

котором отражена последовательность геологических напластований с литологическими и геофизическими характеристиками, а также со стратиграфической привязкой толщ однородного или многопластового строения. В качестве типового разреза может быть принят разрез по одной из скважин, в которой изучаемый разрез геологической среды представлен наиболее полно.

Корреляция разрезов целесообразно начинать с построения профильных геолого-геофизических разрезов, на которых имеется ряд скважин, проведены полевая и скважинная сейсморазведка. Для таких профилей, и в первую очередь проложенных вкрест простирания структуры, строят геоакустические модели по отдельным скважинам и для каждого профиля. Путём сопоставления синтетических и измеренных сейсмотрасс, а также определения по данным ВСП шкалы глубин для временных разрезов, появляется возможность использования последних в качестве основы при корреляции скважин.

На сейсмических профильных разрезах в первую очередь выделяются и коррелируются отражающие горизонты - реперы, которые наиболее чётко выделяются на сейсмотрассах, выдержаны по профилю и квалифицируются по геологическим признакам. Откоррелированные в вертикальной плоскости горизонты - реперы рассматриваются как костяк геолого – геофизических разрезов. Обычно сейсмические репера являются границами и для детальных разрезов, которые строятся по данным ГИС. Сейсмогеологические разрезы строят в одинаковых или разных масштабах по глубине и горизонтали.

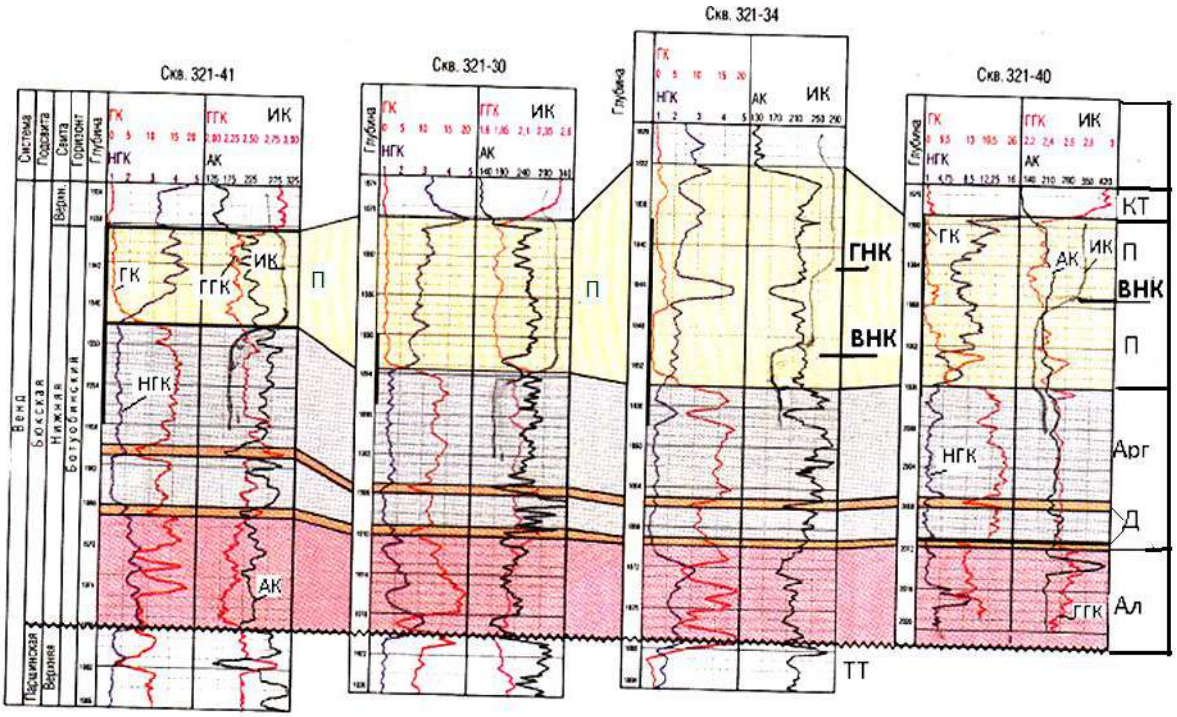


Рис. 3.2. Пример корреляционной схемы по разведочному профилю нефтегазового месторождения Породы разреза: КТ –карбонатная толща; П - песчаники; Арг – аргиллиты; Д – доломиты; Ал – алевролиты ; ТТ – терригенная толща

Для детальной литологической корреляции разрезов скважин применяют методы ГИС, наиболее чувствительные к изменению состава горных пород, или же для этой цели используют уже построенные литологические колонки. На схемах детальной корреляции в последовательности, соответствующей расположению скважин, размещают диаграммы ГИС, выравнивая их точно и приблизительно по реперным границам. Пример представления схемы корреляции по скважинам нефтегазового месторождения приведён на рис. 3.2.

Вначале корреляция осуществляется по реперам. Как и на сейсмических разрезах наиболее чётко выделяются границы между глинистыми и плотными (карбонаты, плотные песчаники, соли) породами. Контроль осуществляется по сейсмогеологическим разрезам, но с учётом возможных небольших отклонений в глубинах. Затем соединяются границы между однотипными по геофизическим признакам пластами и прослоями, которые могут иметь переменную толщину.

На участках выклинивания пластов – коллекторов, связанных с появлением непроницаемых пород, необходимо определять не

только положение границ замещения и выклинивания пород коллекторов, но и устанавливать природу выклинивания. Типичные модели замещения пород – коллекторов приведены на рис. 3.3.

Обычно выделяется два типа границ литологического экранирования:

- потеря пластом коллекторских свойств при сохранении его толщины, которое может происходить на очень небольших расстояниях, и их трудно прогнозировать без использования дополнительных данных.

- постепенное уменьшение толщины пласта до нуля по различным геологическим причинам – стратиграфическое срезание, тектоническое нарушение и др.

Основными источниками информации для определения геологической природы и положения границ замещения (выклинивания) являются данные бурения, ГИС, детальной сейсморазведки и др. Подсказку могут дать результаты корреляции по соседним профилям. Типичные модели замещения пород – коллекторов приведены на рис. 3.3.

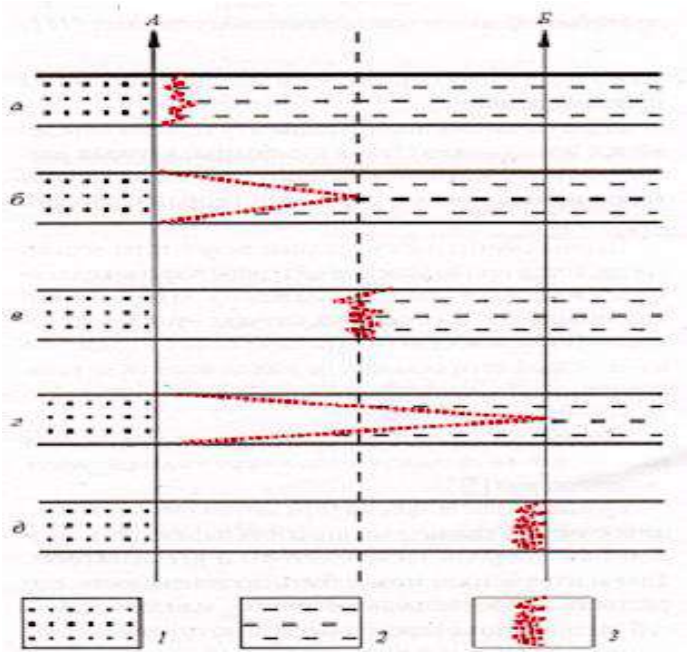


Рис. 3.3. Модели замещения коллекторов в межскважинном пространстве скважин А (скрывшей коллектор) и В (пробуренной в зоне отсутствия коллектора)
1 – коллектор; 2 – неколлектор; 3 – зона замещения пород - коллекторов неколлекторами [5]

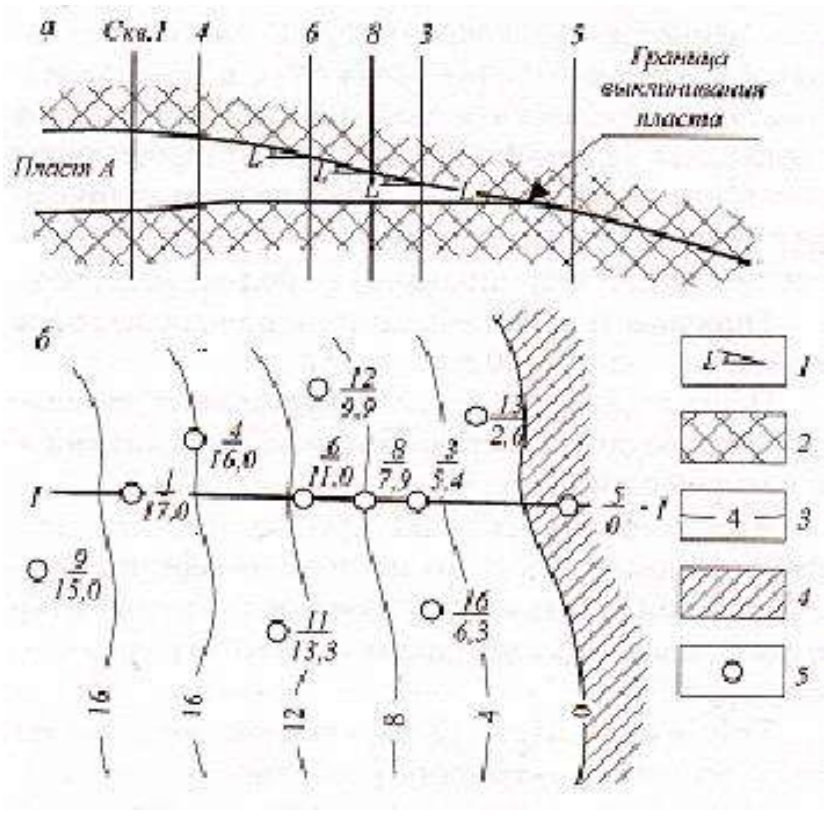
Замещение коллектора может происходить непосредственно вблизи скважины, в которой он вскрыт (рис. 3.3 *а*) или уменьшение толщины коллектора происходит на середине расстояния между

скважинами А и Б (рис. 3.3 *б*). Возможен случай, когда коллектор сохраняет свою толщину до середины расстояния между скважинами и затем резко она резко уменьшается до нуля (рис. 3.3 *в*).

На следующих моделях коллектор плавно или резко выклинивается к скважине, в которой он отсутствует (рис. 3.3 *г* и *д*). Определенную помощь в выборе модели выклинивания коллектора может оказать сейсмогеологический разрез.

Одним из методов определения линии выклинивания является метод экстраполяции градиента изменения эффективной толщины пласта на участке предполагаемого выклинивания. Для этого по данным замеров в скважинах толщин исследуемого пласта строится карта толщин по площади и определяется градиент изменения толщины пласта. По установленному градиенту изменения толщин определяется положение нулевой изопахиты, которая рассматривается как линия полного замещения коллектора продуктивного горизонта непроницаемыми породами (рис. 3.4).

Рис. 3.4. Пример определения границ выклинивания пласта по градиенту изменения эффективных толщин



Цифры у скважин в м.:числитель – градиент изменения толщины, знаменатель - толщина коллектора [5]

Несогласное залегание свидетельствует о том, что последовательность напластования нарушена в результате перерывов в осадконакоплении, размывов, тектонических нарушений.

Корреляция разрезов скважин может осуществляться попарно между ближайшими скважинами, находящимися на разных разведочных профилях, по принципу создания трингуляционной сети. На плане показываются скважины, в которых получены пересечения коллектора и рёбрами трингуляции обозначается связь между этими пересечениями. Трингуляционная сеть объединяет скважины пересечения коллектора единой залежи (рис. 3.5).

При большом количестве скважин и наличии нескольких продуктивных пластов с разным временем их формирования корреляция разрезов скважин может осуществляться в автоматическом режиме с применением специальных программ.

В качестве примера на рис. 3.2 приведена корреляционная схема по профилю скважин на нефтегазовом месторождении, обнаруженным в верхневендских песчаных отложениях. По совокупности диаграмм ГИС (ГК, НК, ГГК и АК) в изучаемом разрезе чётко выделяются несколько толщ, сформированных в разных условиях и вре-мени, и квалифицированных как горизонты. Приводимые на корреляционной схеме диаграммы ИК связаны с влиянием не только литологии, но и с характером насыщения коллекторов, поэтому они использованы в корреляционной схеме для увязки пород – неколлекторов, а в дальнейшем - для определения характера и степени флюидонасыщения.

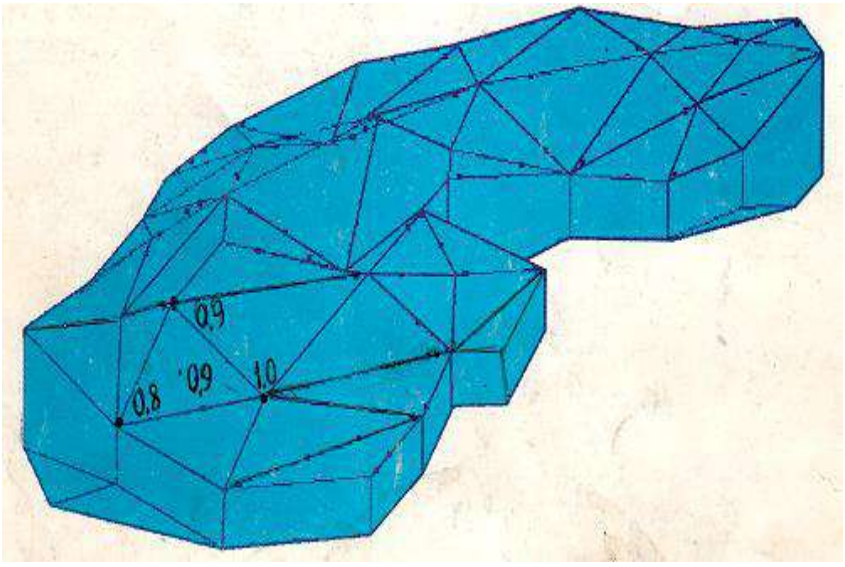
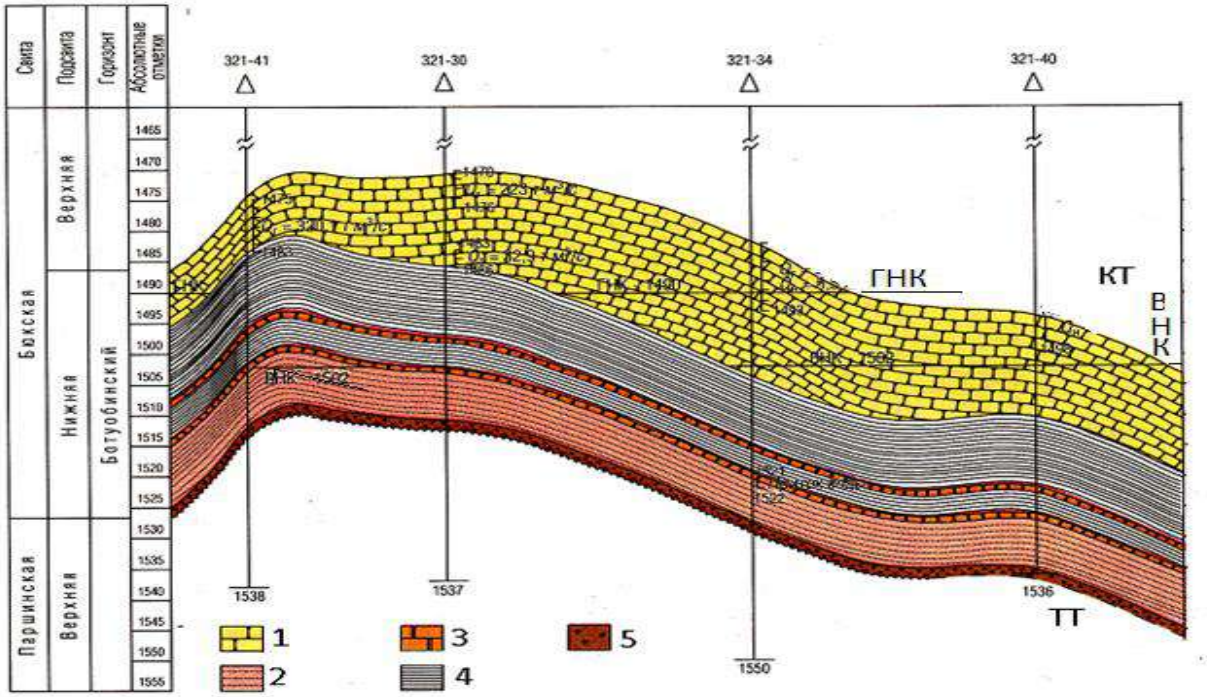


Рис. 3.5. Пример представления результатов попарной корреляции скважин, имеющих пересечения единой залежи, в виде трингуляционной сети с некоторыми значениями показателя линейного нефтегазонасыщения для точек в узлах сетки (скважины) и его средние значения для ячейки сетки

Центральное место занимает стратиграфический горизонт, получивший название Ботуобинский. Сверху он перекрыт плотными, малоглинистыми, низкопористыми, высокоомными и высокоскоростными отложениями с характерными признаками карбонатов.

Карбонатная толща является покрышкой для толщи песчаников в верхах Ботуобинского горизонта, характеризующихся по сравнению с породами покрышки по диаграммам НГК более высокой пористостью и меньшей плотностью (АК, ГГК). На диаграммах ИК карбонатная толща отличается от песчаников пониженной проводимостью. Подстилают толщу песчаников непроницаемые аргиллиты, имеющие повышенную радиоактивность (ГК). Корреляции разрезов скважин помогает наличие в аргиллитах маломощных прослоев доломитов, играющих роль реперов. Особенно чётко они заметны на диаграммах АК.



.

Рис.3.6. Геологический разрез, построенный с использованием корреляционной схемы (см. рис. 3.2)
Породы: 1- песчаники; 2 – алевролиты; 3 – доломиты; 4 – аргиллиты; 5 - брекчия; КТ – карбонатная толща; ТТ – терригенная толща (А. Е. Рыжов и др.)

Толща песчаников по емкостным свойствам занимает промежуточное положение между карбонатной покрышкой и подстилающими аргиллитами. Наиболее четко это заметно по диаграммам НГК, ГГК и АК. Фиксирующие в основании Ботуобинского горизонта алевролиты залегают с размывом на преимущественно глинистой толще. О существовании размыва свидетельствует маломощный слой брекчии с аномальными свойствами, проявившимся особенно

чётко на диаграммах ГИС в скв. 321-30. Признаки брекчирования проявляются локальными положительными аномалиями естественной радиоактивности в верхах терригенной толщи в низах рассматриваемого разреза.

Полученная по результатам корреляции разрезов скважин профильный геологический разрез может рассматриваться как статическая геологическая модель изучаемой структуры (рис. 3.2). Она включает в себя и модель залежи нефти и газа поскольку на ней отражается распределение продуктивных коллекторов и экранирующих пород. В результате анализа обобщённых геолого-геофизических данных удаётся восстановить историю формирования природного резервуара с образованием ловушки для накопления углеводородов и образования продуктивной залежи.

Основание структуры месторождения сложено переслаивающими алевролитами и аргиллитами, образовавшими терригенную толщу (ТТ), сформировавшуюся в морских условиях. В результате регрессии моря произошло его обмеление и рассматриваемый участок оказался в прибрежной зоне. Благодаря этому за счёт сноса с берега укрупнённого обломочного материала на мелководье сформировались отложения, превратившиеся впоследствии в песчаники с повышенными пористостью и проницаемостью, имеющими признаки коллекторов.

В результате очередной резкой трансгрессии моря песчаные отложения оказались отодвинутыми от берега и над ними начали накапливаться известняки. Пористые образования оказались запечатанными плотной и практически непроницаемой карбонатной толщей (КТ), а снизу их ограничили также непроницаемые глинистые отложения, превратившиеся впоследствии в аргиллиты. В результате образовалась ловушка, благодаря наличию которой сюда по субвертикальным диструкциям просочились углеводороды и здесь сформировалась нефтегазовая залежь. По данным метода ИК удаётся выделить в месторождении газовую шапку (по интервалам с низкой электропроводностью), нефтенасыщенный слой и ту часть песчаников, где сохранилось водонасыщение (по интервалам с повышенной электропроводностью). Для расчленения коллектора на интервалы, насыщенные различными флюидами, с учётом совокупности данных (газовый каротаж, исследования керна и шлама, испытания в скважинах, фиксация притоков) были предварительно опреде-

лены граничные значения сопротивления для ГНК и ВНК, подобно тому, как это показано на рис. 3.1.

4. Палеотектонический, седиментационный и фациальный анализ

4.1. Палеотектонический анализ

Палеотектонический анализ выполняется с целью оценки влияния тектонических процессов в период седиментации и позднее на историю формирования природных резервуаров, включающих залежи нефти и газа. Получаемые результаты углубляют представления о седиментационных циклах изучаемых отложений, что способствует построению геолого-геофизической модели месторождения.

Палеотектонический анализ состоит в применении палеоструктурных карт и палеопрофилей, методика построения которых основана установлении толщин стратиграфических пачек пород в соответствующие периоды их формирования. По изменениям толщин отдельных горизонтов судят об амплитудах тектонических движений. Считается, что при подъёме горизонта происходит уменьшение его мощности и подъём кровли нижележащего горизонта. При опускании мощность горизонта увеличивается.

В комплексе осадочных пород, принимающих участие в геологическом строении складки, выбираются реперы, чётко прослеживающие в пределах изученной площади. Каждый репер ввиду ограниченности исследуемого участка (локальные структуры) может быть принят за нулевую горизонтальную плоскость, от которой строятся палеоструктурные карты поверхности горизонта, формирование структуры которого является объектом исследования. Подобным же образом строятся палеопрофили, отражающие распределение мощности от выбранного репера до поверхности подошвы исследуемого горизонта. Такой подход позволяет отвлечься от совре-

менного строения разреза и представить конфигурацию исследуемой толщи в период завершения её формирования.

Палеотектоническая карта фактически представляет собой карту толщин стратиграфического горизонта. Такие карты наиболее наглядны и информативны для решения задач палеотектонического анализа. Они позволяют рассмотреть информацию о конседиментационном прогибании дна осадочного бассейна в различные периоды и реконструировать этапы развития потенциальных ловушек углеводородов с прогнозом характера их насыщения.

Более наглядно оценить характер тектонических движений в заданных направлениях можно по палеотектоническим разрезам. Они последовательно строятся от кровли выровненного (в виде горизонтальной линии) стратиграфического горизонта путём откладывания тощины этого горизонта вниз. В результате получают набор палеотектонических профилей.

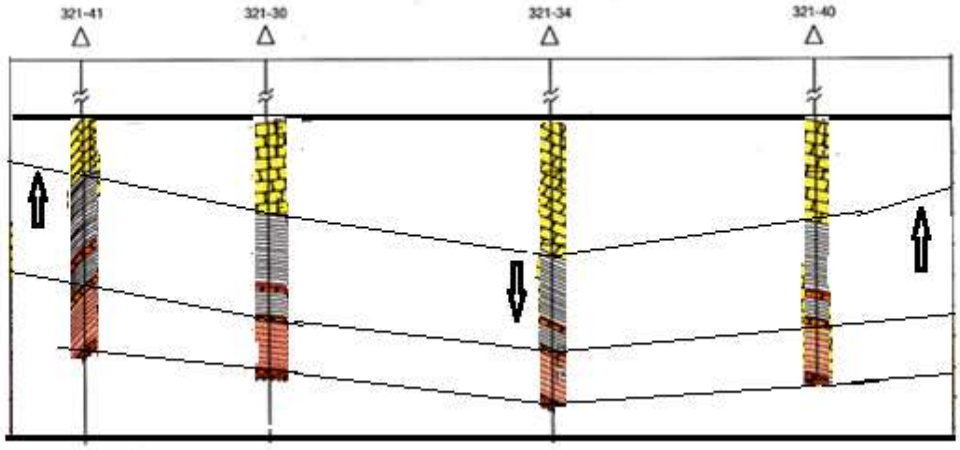


Рис. 4.1 Пример палеореконструированного горизонта песчаной толщи из разреза рис. 3.6

В качестве примера на рис. 4.1 приводится палеотектонический профиль для продуктивной толщи песчаников нефтегазового месторождения, современный разрез для которого показан на рис. 3.6. На корреляционной схеме месторождения, представленной с выравниванием по кровле нижней терригенной толщи, и палеотектоническом профиле толщи песчаников видно, что в начальный период формирования низов ботуобинского горизонта условия седиментогенеза на изучаемой территории были одинаковы. На это указывают одинаковые мощности глинистых пород по всем скважинам разведочного профиля (рис. 3.2 и 4.1). Когда же стали накапливаться собственно ботуобинские песчаники физико-химические условия осадконакопления претерпели существенные изменения. Следствием этих изменений в первую очередь стало то, что в западном направ-

лении происходило поднятие дна бассейна с формированием в этом направлении береговой линии. Одновременно происходило погружение дна в районе центральной части рассматриваемого профиля с увеличением толщины песчаной толщи.

Помимо наглядного графического способа палеотектонического анализа применяют графо-аналитическую обработку значений толщин. Модели палеотектонических процессов строятся на основе математической статистики. При этом устанавливают графики зависимости абсолютных глубин базисной поверхности от толщины изучаемого стратиграфического интервала с помощью линейного уравнения зависимости толщины стратиграфического интервала от абсолютной отметки глубины залегания базисного горизонта. Определяемые при этом коэффициенты уравнения имеют определённый геологический смысл.

4.2. Седиментационный анализ

Разрезы**,** сложенные осадочными породами представляют собой чередование пластов различного литологического состава, возраст которых последовательно уменьшается снизу вверх. При согласном залегании пластов их чередование представляет собой закономерную последовательность, которая в разрезах вскрытых разными скважинами, одинакова. При несогласном залегании пластов последовательность напластования нарушена в результате перерывов в осадконакоплении, размывов, тектонических нарушений. Это проявляется в постепенном изменении толщины отложений, в выпадении или повторении в разрезах соседних скважин пластов или больших интервалов разреза. Условия седиментации устанавливаются при стратиграфической корреляции разрезов, заключающейся в выделении и объединении одновозрастных слоёв иногда даже разного литологического состава. Такая картина наблюдается в результате латерального изменения фаций.

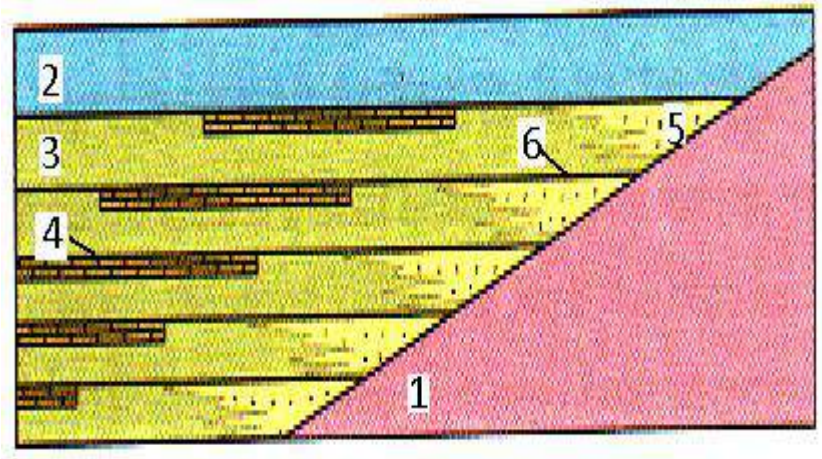
Седиментационный анализ предполагает разделение осадочных отложений на седиментационные циклы, часто именуемые как толщи непрерывного наращивания, во времени протекания однонаправленого геологического процесса. Поскольку при таком процессе во многих случаях энергия среды осадконакопления возрастает (регрессивный характер разреза) либо убывает (трангрессивный характер разреза), седиментационные циклы проявляются в геологиче-

ском разрезе в виде определённой последовательности смены литотипов (парагенетические ряды). Смена литотипов свидетельствует о смене фациальной обстановки осадконакопления. Но поскольку различные литотипы имеют разные физические свойства, существует возможность выделять седиментационные циклы по данным ГИС, применяя при этом знания о теоретически существующих геологических структурах.

Установлено, что при применении полного комплекса методов ГИС можно выделять до 30 разновидностей осадочных пород, что позволяет с одной стороны построить детальный разрез изучаемого интервала, а с другой стороны обосновать возможность объединения нескольких литотипов в единый седиментационный цикл. Непрерывная информация о процессе осадконакопления, устанавливаемая по диаграммам каротажа, даёт возможность проследить за изменением литологической характеристики объекта и доказать, что эти изменения происходили в период единого седиментационного цикла.

Процесс расчленения разрезов скважин начинается с выделения устойчивых стратиграфических границ. Их определяют по реперам, роль которых играют выдержанные по площади и толщине пласты, литологически заметно отличающиеся от выше и нижележащих отложений. Если пласт имеет характерную, ярко выраженную на диаграммах ГИС поверхность, её называют реперной границей. Например, в расмотреенном выше нефтегазовом месторождении верхней реперной границей для стратиграфической ботуобинской толщи с продуктивным пластом песчаников является подошва горизонта карбонатов, а нижнюю реперную границу можно отождествлять с размытой кровлей преимущественно глинистой терригенной толщи, начинающейся с прослоя брекчий. Обе эти реперные границы чётко фиксируются резкими скачками физических свойств на диаграммах всех методов ГИС (см. рис. 3. 2 и 3. 6).

Внутри выделяемых стратиграфических интервалов, как правило, существуют нерегулярные границы между литологически различными отложениями. Для обоснования корреляции нерегулярных границ необходимо установить характер цикличности



и закономерности в наращивании разреза, причиной которого являются конседиментационные тектонические процессы.

Рис. 4.2 Пример модели разреза с серией трансгрессивных седиментационных циклов

1 – континентальный склон; 2 – уровень моря; 3 – глины; 4 – карбонаты: 5-песчаники; 6 – стратиграфические границы – уровни стояния моря [2]

Закономерность изменения толщин и связанное с ней вероятное положение нерегулярных стратиграфических границ позволяет установить палеотектонический анализ. Так для разреза на рис.3. 6 и 4. 1 нерегулярная граница может быть выделена между песчаниками и аргиллитами в пределах ботуобинского горизонта. Проявление этой границы вызвано, как показано выше, сменой условий осадконакоп-ления.

Вследствие устойчивого процесса однонаправленного процесса трансгрессии или регрессии моря может быть выделено большое количество однотипных седиментационных циклов. Примером может служить модель серии трансгрессивных седиментационных циклов, представленная на рис. 4.2.

Выделение седиментационных циклов имеет принипиально важное значение в процессе построения геологической модели месторождения и особенно модели объекта подсчёта запасов и его разработки.

4.3 Фациальный анализ

При фациальном анализе решается задача по выяснению физико – географической обстановки формирования отложений, включающих продуктивные коллекторы. Единый принцип фациального анализа основан на том, что отложения каждой фации формировались в условиях определенных палеогидродинамических режимов (уровней). Это даёт возможность определить для каждой фации свою седиментационную модель, отражающую свойственную только данной фации последовательную смену палеогидродинамических уровней во времени.

Информацию о фациальной обстановке среды осадконакопления получают методами: геологическими, сейсмо - стратиграфическими, промыслово - геофизическими. Вклад фациальной интерпретации данных ГИС в общий комплекс этих методов может быть весьма

существенным, несмотря на то, что многие характеристики фациальной обстановки получаются косвенным путём.

Прежде всего это касается определения характерных литотипов, по присутствию которых в разрезе делается заключение об обстановке накопления осадочных толщ. В разделе 1 показано, что разделяются фации континентальных, прибрежно-морских и глубоководно-морских отложений. Так преобладание в изучаемой толще карбонатов свидетельствует о морской обстановке осадконакопления. При терригенном разрезе с прослоями известняков делается вывод о прибрежно - морской фации осадков. Преобладание песчано-аллювиаль-ных отложений характерно для фаций континента.

Разнятся литотипы, сформированные в различных условиях и по ряду свойств. Например, в континентальных отложениях глины значительно более высокоомны, чем это характерно для морских глин. При анализе содержания естественных радиоактивных элементов (спектрометрический вариант ГК) установлено, что в континентальных глинах преобладает торий, а в морских - уран. Это связано с существованием фациально невыдержанных отложений, типичных для континентального и прибрежно - морского и дельтового генезиса, когда нарушается корреляция тел – коллекторов в пределах относительно небольших территорий. В таких условиях целесообразно свиты отождествлять с отдельными литологическими разностями, надёжно фиксирующие изменение климата или тектонических условий. В разрезе тогда выделяют ритмосвиты, которые образуют каркас стратиграфических схем. И хотя строение ритмосвит по площади может изменяться с выпадением отдельных составляющих, они объединяют горные породы, сформировавшиеся в близких фациальных условиях.

В качестве примера можно сослаться на рис.1.8, на котором изображены диаграммы электрометрии для разреза, отражающего действие регрессии моря с формированием группы фаций. Из него видно, что наряду с существованием стабильных условий для образования отложений в морском мелководие, выделяется группа фаций, связанных с временным отступлением моря на площади существования дельты крупной реки, то в надводных, то в подводных условиях. Это привело к образованию группы фаций, которые можно объединять в единую ритмофацию.

Детальное фациальное расчленение осадочных толщ возможно по параметрам, определяемым по данным ГИС. Например, по сред-

нему $d_м$ (медианному) размеру зёрен, который характеризует энергию осадконакопления, и позволяет уточнить фациальную принадлежность отложений. Предпосылки для этого имеют методы ПС и ГК, по показаниям которых (по параметру α) устанавливают зависимости для оценки $d_м$. Согласно исследованиям В. С. Муромцева связь между $d_м$ (мм) и $\alpha_{пс}$ близка к прямой с уравнением

$$lgd_м = 2\alpha_{пс} -2,4. \quad (4.1)$$

Т. С. Изотова обосновала формулу, связывающую $d_м$ (мкм) с коэффициентами пористости $К_п$ (д.е.) и проницаемости $К_{пр}$ ($мкм^2$):

$$d_м =A(1- К_п)/(0,0556 К_п^3/ К_{пр})^{1/2}, \quad (4.2)$$

где А=6 для уплотнённых пород и А=12 для коллекторов.

Предложен ряд способов для количественной оценки неоднородности пластов, позволяющих судить о фациальной принадлежности горных пород и в первую очередь коллекторов. Одновременно определяются условия добычи нефти или газа из этих объектов.

Часто вычисляют коэффициент песчанистости интервалов разреза мощностью Н, в котором песчаник содержит глинистые или карбонатные непроницаемые прослои с общей их толщиной h

$$К_{песч}=(H-h)/H. \quad (4.3)$$

Для оценки текстуры пачки чередующихся пропластков литотипов вычисляют текстурный коэффициент $С_т$

$$С_т = h_{ср}/n, \quad (4.4)$$

где $h_{ср}$ – средняя толщина литотипа, а n – количество пропластков в пачке.

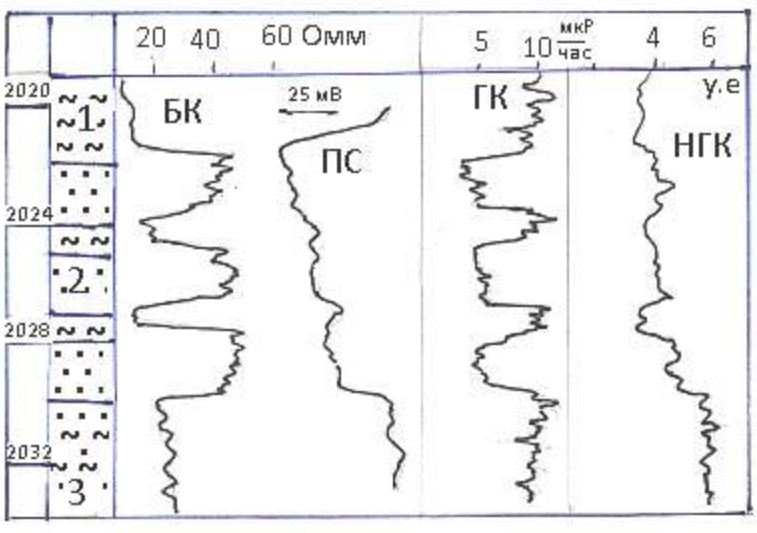


Рис.4.3. Пример диаграмм ГИС для неоднородного пласта - коллектора, по показаниям которых вычислены характеристики его неоднородности

Количественный анализ неоднородности пластов толщиной Н с количеством N пропластков коллектора общей толщиной Нк производят с помощью коэффициента расчленённости КР

$$КР=Н_к/Н\cdot N, \quad (4.5)$$

а также по вычислениям интегрированного коэффициента неоднородности пласта КН с учётом минимальной и максимальной пористости исследуемого пласта в разрезе скважины

$$КН = КР\cdot К_{п\ мин}/К_{п\ макс}. \quad (4.6)$$

Для примера на рис. 4.3 приведен фрагмент разреза с неоднородным пластом песчаников и диаграммы методов ГИС. Пласт песчаников общей мощностью 8 м содержит два прослоя глин толщиной 1 м каждый. Пористость песчаных частей пласта находится в пределах 0,2 – 0,25, т.е. они обладают коллекторскими свойствами. Вычисляя для данного пласта по приведённым выше формулам характеристики неоднородности, получим: $К_{пес}$=0,75; $С_т$=0,4; КР=0,25; КН=0,25.

Для вскрытого на этом же месторождении однородного пласта песчаников приблизительно такой же мощности, пористость которого колеблется от 0,26 до 0,20 (с глубиной увеличивается глинистость пласта), имеем $К_{пес}$=1; $С_т$=1, КН=1; КН=0,77. Характерно, что упомянутые пласты резко отличались по дебиту нефти. Для первого пласта он составлял 6 $м^3$/сут, а для второго – 72 $м^3$/сут.

Особого внимания требует способ, основанный на использовании для фациального анализа зависимостей между литофизическими свойствами горных пород и кривых электрокаротажа и, в первую очередь, диаграмм ПС. На них наиболее отчётливо отражается смена палеодинамических условий осадконакопления, что позволяет опре-

делять генезис осадков и осуществлять реконструкцию палеогидродинамических обстановок формирования коллекторов.

Размер обломочного материала скелета и содержание глинистого вещества в породах отражают палеогидродинамические уровни водных потоков, а медианный размер зерен сопоставим с относительными амплитудами ПС. Это позволило В. С. Муромцеву и его последователям разработать и успешно применять на практике электрометрические модели фаций. Сущность способа и его эффективность рассмотрим на примере изучения юрских отложений Северо – Юрьевского нефтяного месторождения (З. Сибирь, Сургутский свод).

В рассматриваемых отложениях выделено несколько фаций, относящихся к прибрежно – морскому комплексу (все текстовые и графические сведения по А. В. Ахиярову). Это фации барьерных островов, промоин и головных частей разрывных течений, вдоль береговых баров и прибрежных валов (см. раздел 1 и рис. 1.3). Результаты выделения этих фаций приведены на рис. 4.4. При фациальном районировании исполнители опирались на формализованные электрометрические модели фаций, обоснованные В. С. Муромцевым (рис. 4.5), данные оценки диаметра песчаных зёрен и характеристики неоднородности пластов.

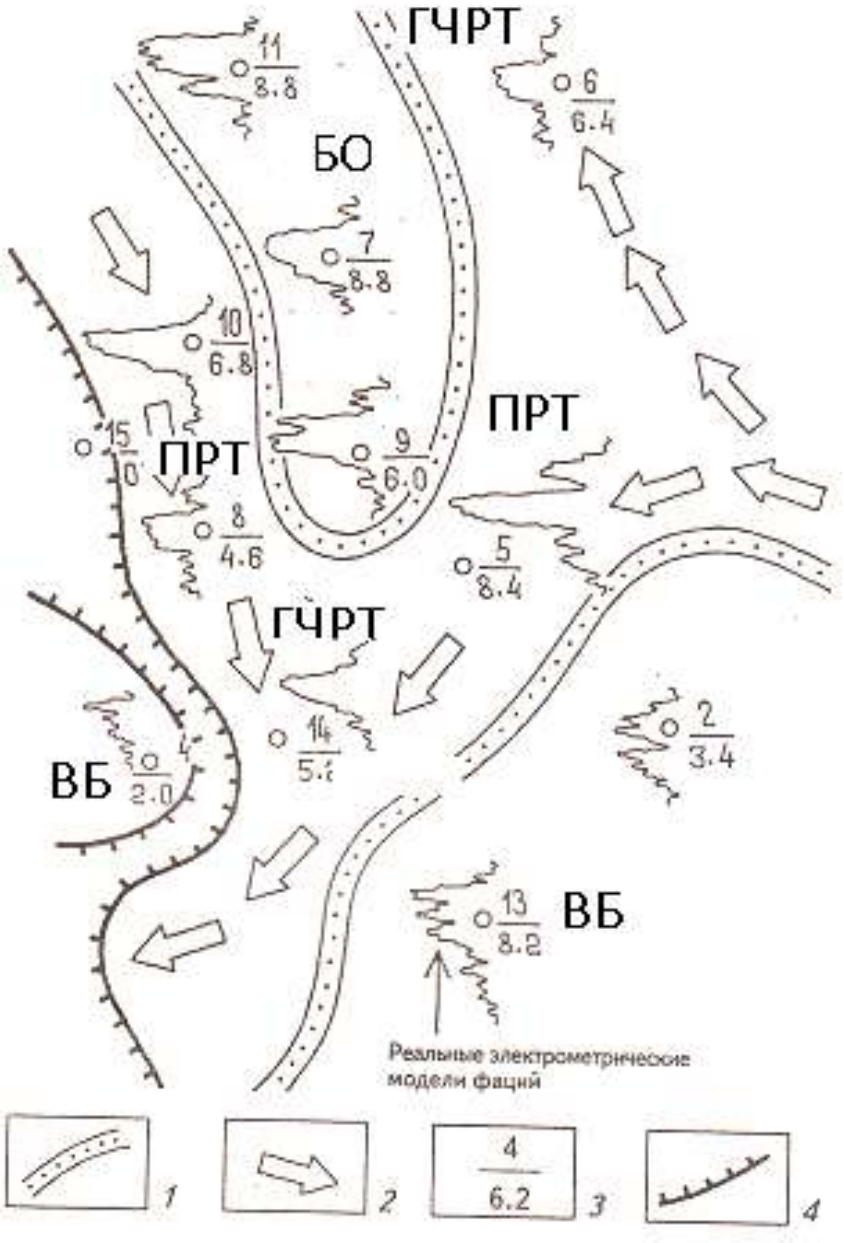


Рис. 4.4. Пример фациального районирования песчано-глинистых отложений
1 - границы распространения фаций; 2 – предполагаемые направления движения разрывных течений; 3 – номер скважины (числитель) и

эффективная толщина коллектора (знаменатель); 4 – зона глинизации по данным сейсморазведки и ГИС; фации: БО - барьерных островов; ПРТ - промоин разрывных течений; ГЧРТ - головных частей разрывных течений; ВБ - вдоль береговых баров

Интегрированный фациальный анализ позволяет прогнозировать размещение добывающих скважин и ожидаемый их дебит (в основном качественно). Например, по результатам анализа рассматриваемой выше площади наиболее перспективной для добычи признана фация барьерных островов, так как для пластов песчаников характерна высокая степень однородности, диаметр зёрен около 0,2 мм. Практика добычи показала, что из коллекторов, отнесённых к этой фации, получены самые продуктивные притоки нефти (около 75 $м^3$/сут). Высокой неоднородностью, а также песчано-алевритовым характером зёрен ($d_м \approx 0{,}05$ мм) отличались песчаные коллекторы



Рис. 4.5. Морфология аномалий ПС, характерных для типовых фаций прибрежно - морских отложений

вдольбереговых баров и головных частей разрывных течений. Дебит скважин из пластов этой фации составил 5 – 10 м^3/сут. Минимальной продуктивностью отмечены коллекторы фаций промоин разрывных течений и резкой смены регрессивного цикла на трангрессивный (на рис. 4.5 скв 2).

5. Изучение непроницаемых неоднородностей продуктивных терригенных коллекторов методом КС

5.1 Модели неоднородностей

Для завершения формирования геолого – геофизической модели залежи углеводородов имеется возможность уточнить представление относительно внутренней структуры продуктивных коллекторов. Нередко пласты или даже горизонты песчанистых коллекторов содержат геологические неоднородности. К ним относятся непроницаемые карбонатные или глинистые прослои или их локальные линзы, а также участки развития трещинноватости. Упрощенные модели этих неоднородностей в разрезе показаны на рис. 5.1. Обычно подобные объекты отличаются от коллекторов по увеличению (карбонаты) или уменьшению (глинистые и трещиноватые породы) удельного сопротивления (УС). При изучении по данным ГИС УС и других физических свойств разделить протяжённые и локальные неоднородности часто не удаётся и выводы об их размерах делаются лишь по результатам корреляции геологических колонок скважин.

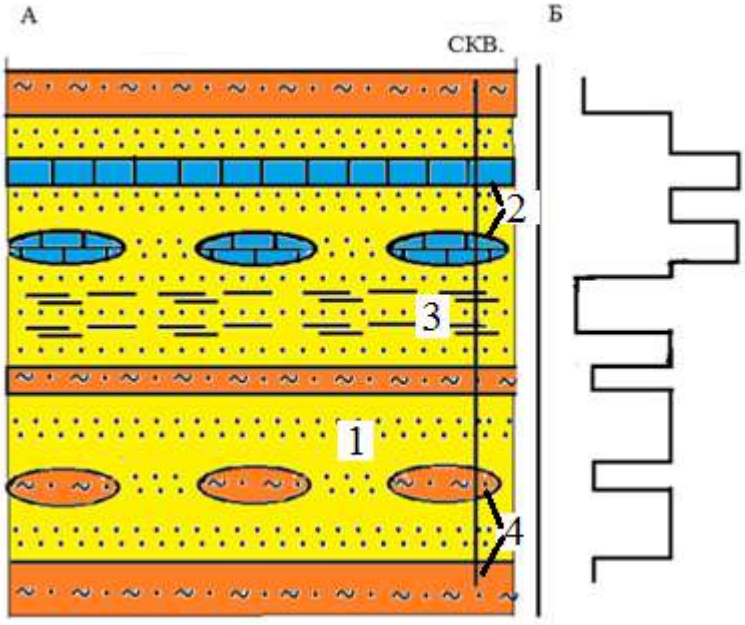


Рис. 5.1. Геоэлектрическая модель разреза с песчаным продуктивным коллектором, содержащим неоднородности, отличающиеся по удельному сопротивлению от вмещающей среды

А – разрез; Б – график УС по условной скважине

1 – песчаный коллектор; 2 – карбонаты; 3 – трещиноватость; 4 – глинистые породы

Литология неоднородностей и их УС обычно легко определяются по показаниям комплекса методов ГИС, а вот данные о форме и размерах в пространстве этих неоднородностей получить оказывается достаточно сложно. Вместе с тем при составлении геолого - геофизических моделей для подсчёта запасов, гидродинамического проектирования, планирования разработки нефтегазовых залежей и других целей получить представление о структуре неоднородных коллекторов весьма важно. Протяженные слои непроницаемых пород даже при их малой мощности изолируют разделяемые ими части пластов – коллекторов, что усложняет гидродинамическую обста-

новку, и они должны быть исключены при определении эффективной мощности коллекторов и учтены при гидродинамическом моделировании. Ограниченность неоднородностей является благоприятным признаком в коллекторе, так как не уменьшает его фильтрационно – ёмкостные характеристики и в меньшей степени усложняет структуру коллектора.

5.2 Теоретические предпосылки изучения маломощных неоднородностей

Наиболее благоприятные предпосылки для изучения неоднородностей имеют исследования с потенциал – зондом (ПЗ), условно АМ, метода КС, на показания которого влияют как электрические свойства, так и геометрия объекта.

Начнём со случая, когда мощность h пересекаемой скважиной неоднородности меньше АМ. Для оценки влияния размеров неоднородности на показания зонда воспользуемся моделью предельно тонкого диска - изолятора радиуса R. С целью формирования расчётных формул используем решение, полученное в смешанной (декартовой и эллиптической) системе координат [11]. Связь между этими системами вытекает из уравнения $x^2/R^2(\lambda^2+1) + z^2/ R^2\lambda^2=1$ (рис. 5.2). Будем полагать, что УС вмещающей среды ρ_0 равно 1.

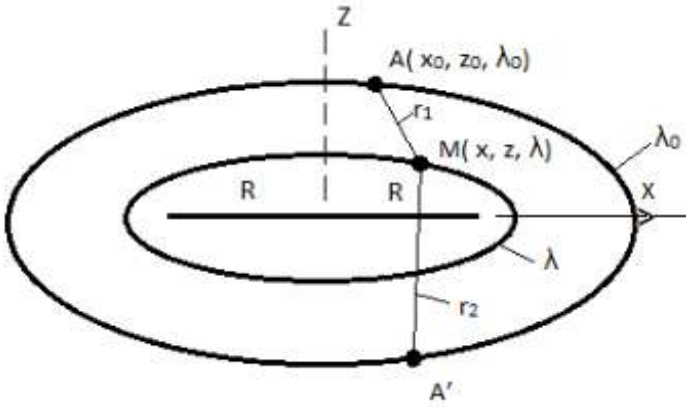


Рис. 5.2. Схема, поясняющая условия расчета $\rho_к$ при заданных положениях точечного источника тока (А) и точки наблюдения (М) в декартовой и эллиптической системах координат в присутствии тонкого диска радиуса R

При заданных положениях точечного токового источника А (x_0, z_0, λ_o) и точки наблюдения М(x, z, λ), (для упрощения $y = y_o = 0$) выражение для кажущегося сопротивления по условной скважине, нормально пересекающей диск – изолятор, имеет вид:

$$\rho_к=1 + r_1/\pi[r^+ arc\ tan\frac{r_2-r_1}{2R\lambda_o\lambda} + r^- arc\ tan\frac{r_2+r_1}{2R\lambda_o\lambda}],$$

(5.1)

где $r^{\pm}=\frac{1}{r_2}\pm\frac{1}{r_1}$, $r_1=[(x-x_0)^2+(z-z_0)^2]^{½}$, $r_2=[(x-x_0)^2+(z+z_0)^2]^{½}$.

Для модели диска – проводника при тех же элементах схемы (рис. 5.2)

$$\rho_к=1+r_1/\pi\{2/R \quad \text{arccot}\lambda_o\text{arccot}\lambda \quad - \quad [r^{+}arc\tan\frac{r_1+r_2}{2R\lambda_o\lambda}+r^{-}arc\tan\frac{r_2-r_1}{2R\lambda_o\lambda}]\}. \quad (5.2)$$

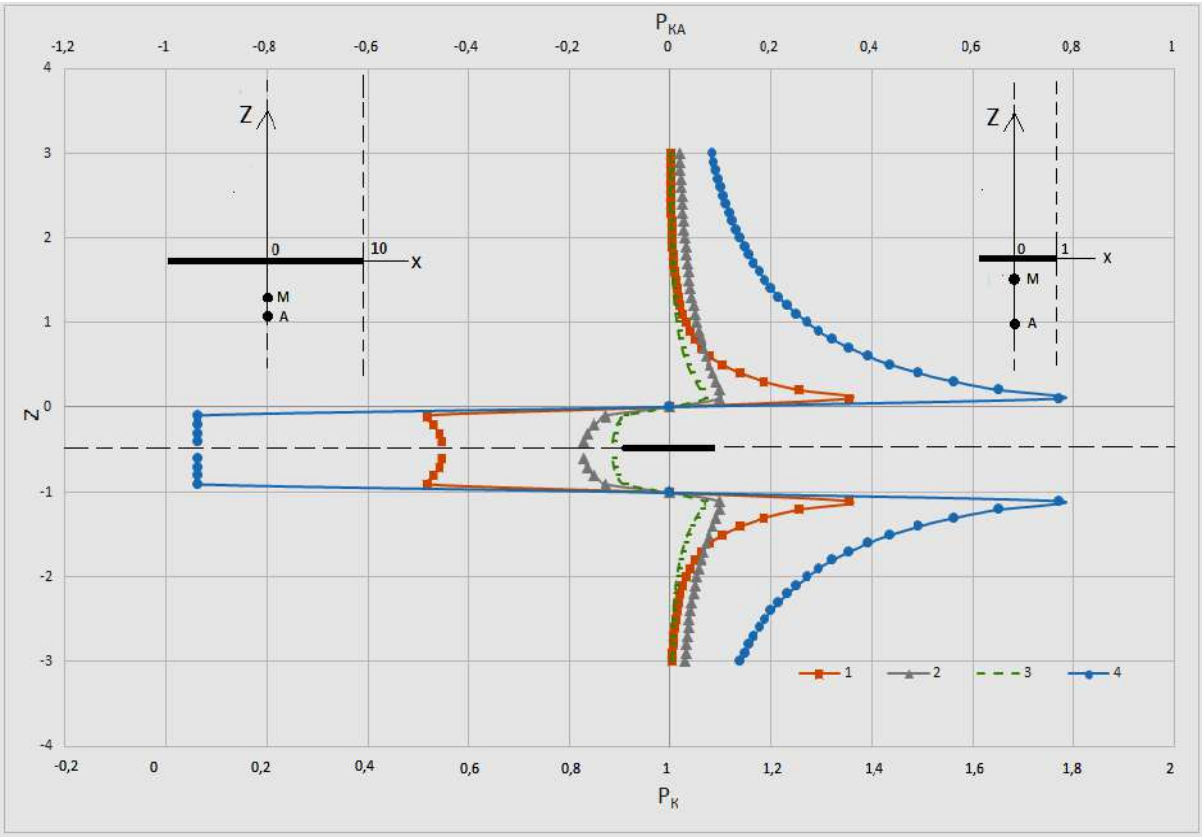


Рис. 5.3. Теоретические кривые $\rho_к$ для потенциал – зонда АМ при различных относительных размерах тонкого диска – изолятора и положения условной скважины

1 – x=0, R=1; 2 – x=10 R=10; 3 – x=1, R=1; 4 – x=0, R=10

Из теории метода КС [6] известно, что для пласта – изолятора предельные аномальные значения $\rho_к$ для ПЗ равны 0 и 2. На рис. 5. 3 приводится серия кривых $\rho_к$ (а также аномальной составляющей $\rho_{кА}$), рассчитанных для диска – изолятора ограниченного радиуса, по которым можно судить о влиянии на амплитуду аномалий величины R. Все линейные размеры даны в долях длины зонда АМ=1

Например, для R=10 при x=0 (трасса наблюдений проходит через центр диска) $\rho_к^{max}$=1,8, а $\rho_к^{min}$=0,05. Заметнее отличия аномальных значений $\rho_к$ от модели бесконечного пласта при прохождении трассы наблюдений через край такого диска: $\rho_к^{max}$=1,1 (аномалия меньше в 10 раз) и $\rho_к^{min}$=0,83 (аномалия меньше в 6 раз). В случае же малых размеров диска (R=1) аномальные значения ещё меньше (см. рис. 5.3). Следовательно, уменьшение размеров модели неоднородности, а также близость скважины к краю диска вызывает заметное ослабление аномалий $\rho_к$ относительно ожидаемых значений для бесконечного тонкого пласта – изолятора.

Основываясь на квазиподобии аномалий от объектов различной контрастности УС, можно полагать, что для тонкой неоднородности с высоким но конечным УС влияние конечных размеров объекта повлияет на аномальную составляющую $\rho_к$ в такой же пропорции, как и в случае идеального изолятора. Например, при прохождении трассы наблюдений через край большого тонкого диска с УС равным 5, вместо $\rho_к^{max}$ =1,5 получим $\rho_к^{max}\approx$1,05, а вместо $\rho_к^{min}$=0,35 получим $\rho_к^{min}\approx$0,9.

Реальные электрические свойства пересечений высокоомных неоднородностей могут быть охарактеризованы по данным микрозондов или малого градиент – зонда (ГЗ) одинаковой длины с ПЗ.

При изучении маломощных неоднородностей, представленных непроницаемыми глинистыми породами с пониженным УС, полезны будут результаты математического моделирования с тонким круглым диском - проводником. Используя выражение (5.2), рассчитаны и представлены на рисунке 5.4 кривые КС для нескольких случаев пересечения диска – проводника.

Видно, что в пределах в целом отрицательной аномалии от проводника можно выделить три экстремума: с минимальными значениями $\rho_к^{мин}$ по обе стороны от пересеченного диска и положительный экстремум $\rho_к^{э}$ на самом диске. Наличие локального экстремума не характерно для протяженной неоднородности и является признаком ограниченности объекта.

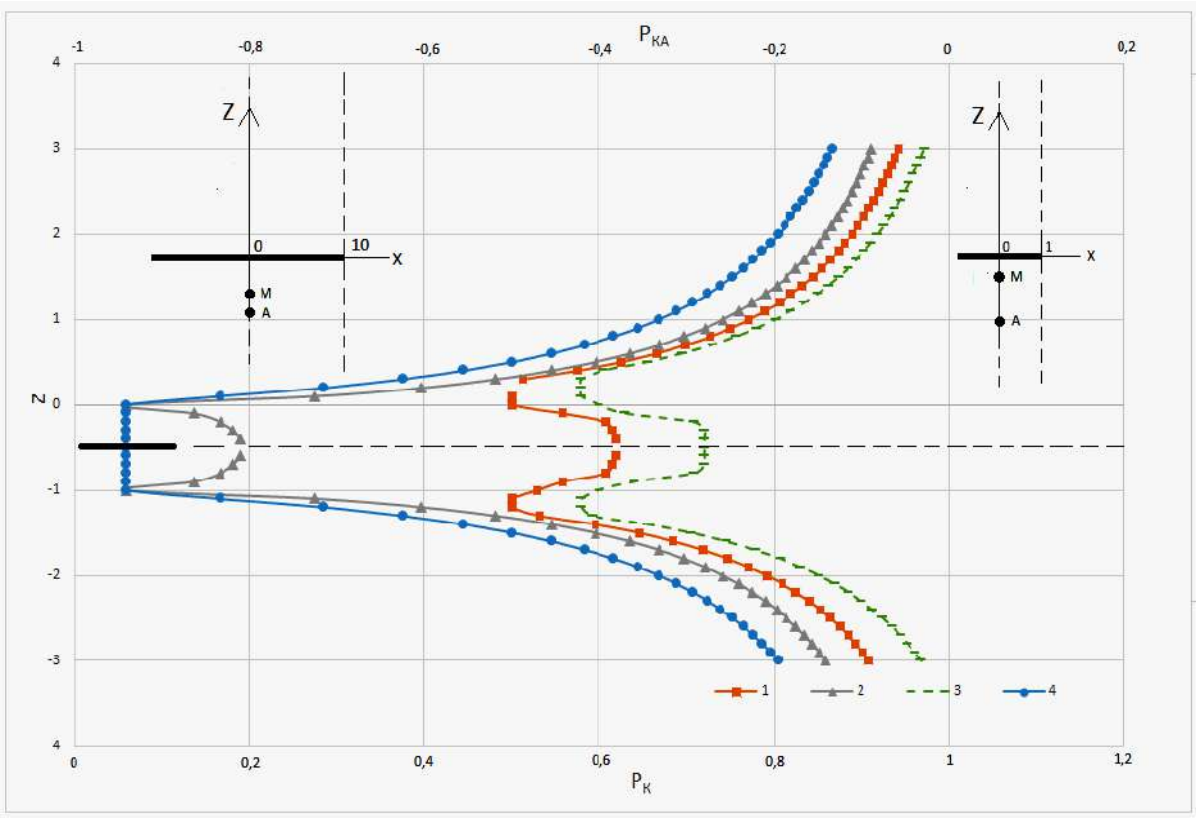


Рис. 5.4. Теоретические кривые $\rho_к$ для потенциал – зонда АМ при различных относительных размерах тонкого диска – проводника
1 – x=0, R=1; 2 – x=10, R=10; 3 – x=1, R=1; 4 – x=0, R=10

Также как для диска – изолятора, ограниченность размеров проводника проявляется в ослаблении аномального эффекта от него. О степени этого ослабления можно судить по приводимым на рисунке 5.4 кривым $\rho_к$. Заметим, что при R=∞ на уровне диска, разделяющего электроды АМ $\rho_к$=0.

Следовательно, слабая аномалия $\rho_к$ для ПЗ на изучаемом прослое – проводнике свидетельствует о его весьма ограниченных размерах по латерали.

Полезно знать признаки проявления аномальности на кривых $\rho_к$ ПЗ при конечных значениях толщины h и УС относительно тонкого протяженного прослоя. Ориентироваться проще всего по точкам с экстремальными значениям $\rho_к$, выраженным в долях УС (ρ_0) вмещающей среды (коллектора). Эти характерные точки показаны на образцах типичных аномальных кривых $\rho_к$ для маломощного прослоя (рис. 5.5).

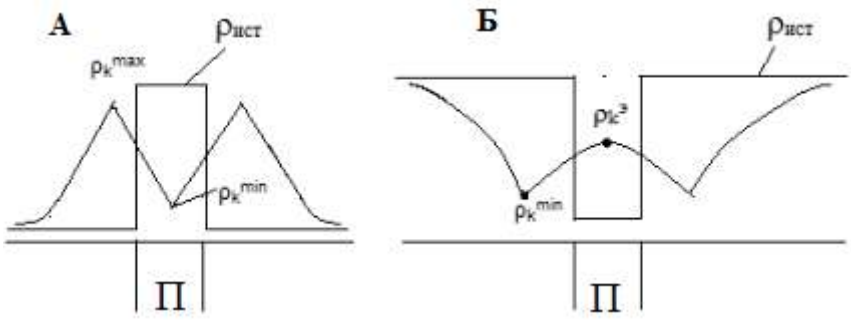


Рис. 5.5. Пример графиков $\rho_к$ (потенциал – зонд АМ) и истинного УС ($\rho^{ист}$) для среды с тонким прослоем (П) относительно повышенного и пониженного УС при его мощности h=0,5АМ

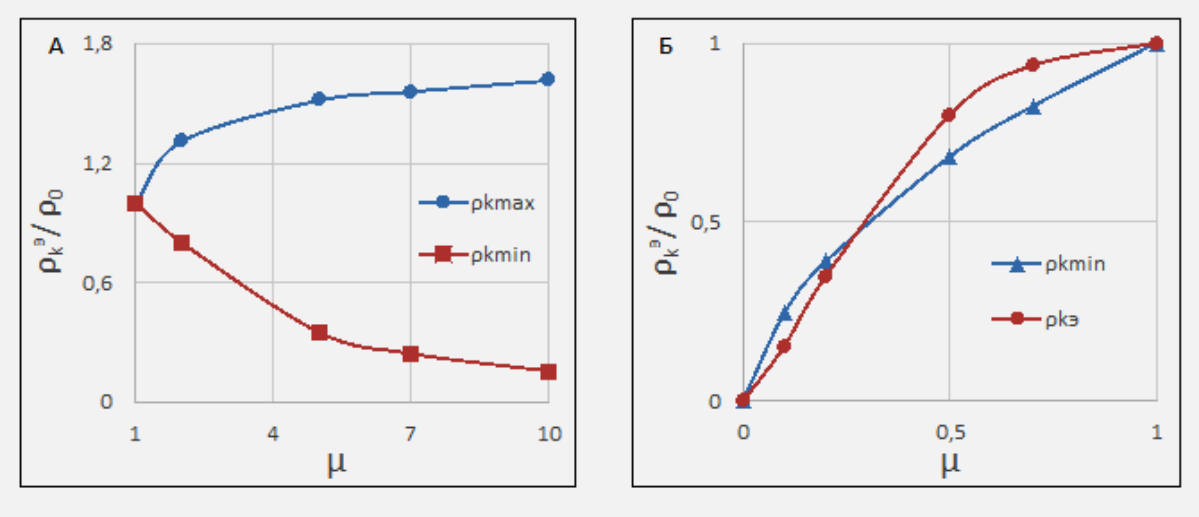


Рис. 5.6. Зависимости относительных значений УС ПЗ в точках экстремумов ($\rho_к^э$ / ρ_0) от параметра $\mu=\rho^{ист}/\rho_0$ для маломощного протяженного прослоя при h=0,5АМ

Для случая h=0,5АМ рассчитаны зависимости экстремальных значений $\rho_к$ от контрастности объекта, то есть от параметра $\mu=\rho^{ист}/\rho_0$. По ним, как для высокоомного (А), так и низкоомного (Б) объектов (рис. 5.6), можно оценить ожидаемые экстремальное значение кривых КС при неограниченных размерах неоднородности.

Очевидно на практике, при анализе аномальных участков диаграмм в случае соответствия значений $\rho_к^э/\rho_0$ тем величинам, которые могут быть определены по теоретическим зависимостям рис. 5.6, обоснованно допустить вывод о большой протяженности неоднородности в коллекторе.

5.3 Обоснование методики оценки размеров неоднородностей

Перейдем к рассмотрению случая, когда мощность неоднородности превышает длину стандартного ПЗ, например, 0,5 м. Для объекта – идеального проводника о его размерах можно судить по площади поверхности *S*.

Для тела в виде круглого цилиндра мощностью *h* от поверхности *S* легко перейти к радиусу цилиндра *R*, по которому можно судить о протяженности объекта. Для идеального проводника *S* определяется через приведенный к току потенциал *U** заряженного тела по известной формуле [12 и др.]:

$$S = (\rho_0/U^*)^2/4\pi. \quad (5.3)$$

Для тел, у которых УС больше или меньше ρ_0 выполняется принцип квазиподобия аномальных составляющих электрического потенциала $U_{ат}$ при одинаковых геометрических параметрах сравниваемых объектов. На теоретических моделях [13] доказано, что коэффициент подобия $m = U^*_а / U_а$ позволяет привести потенциал $U_т$ заряженного тела конечной электропроводности (при определении аномальной составляющей относительно нормального потенциала U_0: $U_{ат} = U_т - U_0$, к условиям идеального проводника:

$$U^* = U_0 + mU_{ат}. \quad (5.4)$$

После этого *U** используется для определения *S* и *R* тела.

Приведенные к току значения $U_т$, U_0, $U_{ат}$ могут быть установлены по показаниям ПЗ. Для определения коэффициента подобия *m* необходимо располагать данными о $\Delta U_{ат}^{гз}$ которые могут быть получены с помощью ГЗ одного размера с ПЗ: $\Delta U_{ат}^{гз} = \Delta U_т^{гз} - \Delta U_{0.}^{гз}$ Так как для приведения показаний ГЗ к условиям идеального проводника необходимо выполнение условия: $\Delta U_0^{гз} + m\Delta U_а^{гз} = 0$, то искомый коэффициент $m = -\Delta U_0^{гз}/\Delta U_а^{гз}$. Для тел с пониженным УС $m>0$, а для относительно высокоомных тел - $m<0$.

Применительно к технологии каротажа методом КС для определения размеров геологического тела во вмещающей среде (в нашем случае непроницаемого прослоя в коллекторе) необходимо

иметь диаграммы $\rho_к$ ПЗ и ГЗ приблизительно одинаковой длины, но не превышающей мощность пересечения тела скважиной. Формально процедура обработки диаграмм КС, упомянутых зондов, состоит в определении значений $\rho_{кт}^{г}$ и $\rho_{кт}^{пз}$ в изучаемом геологическом теле в точках записи (О) при одинаковом положении токового электрода. Например, если для ПЗ значения определяются в середине пересечения, то на диаграмме ГЗ оно берётся со сдвигом на половину длины зонда в сторону от токового электрода. Значения ρ_0 в большинстве случаев по показания ПЗ и ГЗ близки и лишь при малых размерах коллектора наблюдаются различия. Поэтому лучше ориентироваться на ГЗ.

По показаниям ПЗ определяется характеристика вмещающей среды ρ_0, которая соответствует свойствам коллектора, значение $\rho_{кт}^{пз}$ при положении зонда внутри изучаемого тела и его аномальная составляющая $\rho_{ка}^{пз}= \rho_{кт}^{пз}- \rho_0$. По показаниям ГЗ в теле вычисляют аномальную составляющую $\rho_{ка}^{гз}= \rho_{кт}^{гз}- \rho_0$ и коэффициент подобия $m=- \rho_0 /\rho_{ка}^{гз}$. Затем находят искомое значение U^*:

$$U^* = [\rho_0 + m\, \rho_{ка}^{пз}]/ k_{пз}. \qquad (5.5)$$

Далее применяется формула (5.3), после чего можно оценить эффективный радиус тела R, используя уравнение $S=2\pi R^2 + 2\pi Rh$.

Выражение для S можно представить в виде

$$S=0{,}08\, k_{пз}{}^2[1/(1- \rho_{ка}^{пз}/ \rho_{ка}^{гз})]^2. \qquad (5.6)$$

Даже без вычислений можно определить, что если $\rho_{ка}^{пз}\approx \rho_{ка}^{гз}$, то изучаемое геологическое тело (прослой или другой объект) во вмещающей его среде имеет весьма большие размеры ($R \longrightarrow \infty$). И, напротив, заметное превышение по модулю $\rho_{ка}^{гз}$ относительно $\rho_{ка}^{пз}$ свидетельствует об ограниченности размера изучаемого объекта.

При практических работах, если ориентироваться на полуметровый ПЗ, то в качестве ГЗ можно применять стандартный зонд БКЗ с длиной АО= 0,45 м. Предполагается, что используемые при вычислениях значения $\rho_к$ для ПЗ и ГЗ получены при одном и том же положении источника тока в изучаемом прослое. Как понятно из упомянутых теоретических положений, способ пригоден для оценки размеров неоднородностей как повышенного, так и пониженного УС.

Таким образом, располагая диаграммами $\rho_к$ ПЗ и ГЗ одинаковой длины, при сравнительно маломощных неоднородностях (например, меньше 0,5 м) возможно выделить те из них, которые фиксируются потенциал – зондом относительно слабыми аномалиями, и отнести их к классу линзовидных тел весьма ограниченных размеров. Другие же неоднородности, аномалии на которых при известной их контрастности по УС, имеют признаки, характерные для пластов безграничных размеров, следует отнести к классу протяженных прослоев. Можно считать, что их радиус не менее чем на порядок больше длины ПЗ.

5.4 Практические примеры

В качестве практических примеров служат результаты некоторых измерений $\rho_к$ в пределах неоднородных коллекторов по скважинам Спорышевского нефтяного месторождения в ЯНАО Тюменской области. Основное внимание уделим диаграммам ПЗ (АМ=05 м) и ГЗ (АО=0,45 м).

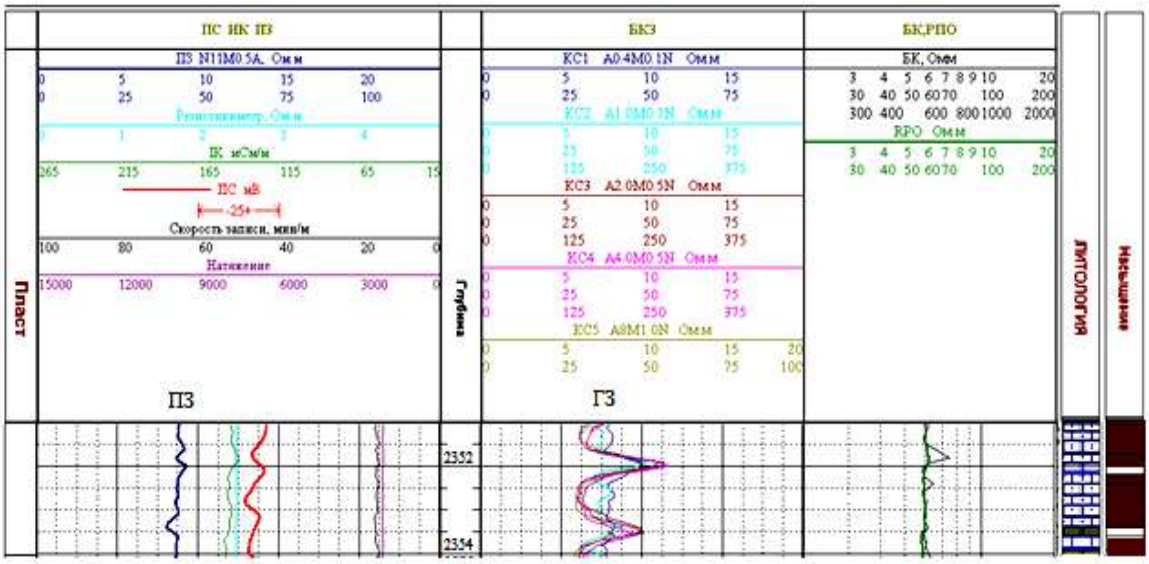


Рис. 5.7. Пример проявления ограниченности размеров маломощных включений карбонатов в продуктивном песчаном коллекторе по показаниям ПЗ и ГЗ

На рис. 5.7 приведены диаграммы ПЗ и ГЗ для пласта продуктивного коллектора с двумя пересечениями относительно высокоомных карбонатов малой мощности. Они чётко фиксируются повышением $\rho_к$ по ГЗ, но на диаграмме ПЗ имеют отрицательные аномалии и заметно меньшие по величине, чем можно было ожидать в случае существенной протяжённости рассматриваемых неоднородностей (см. рис.5. 6 А). Следовательно, это линзовидные тела ограниченной длины, выклинивающиеся в коллекторе.

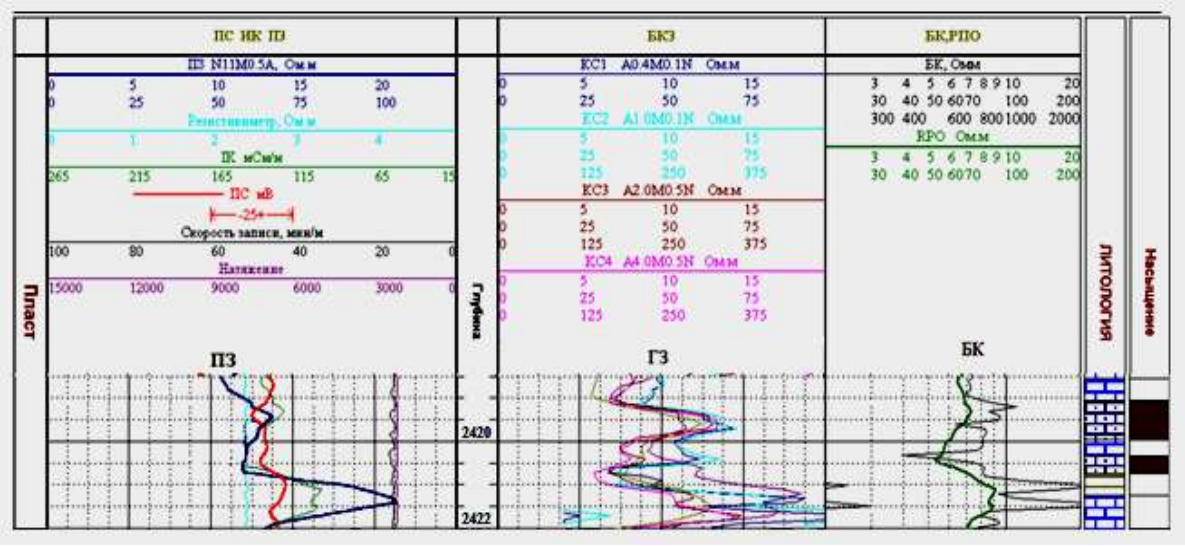


Рис. 5.8. Пример проявления ограниченного по размерам прослоя глинистых пород в продуктивном песчаном коллекторе по показаниям ПЗ, ГЗ и БК

Другой пример проявления ограниченности по размерам низкоомного прослоя глинистых пород на диаграммах КС иллюстрирует рис. 5.8. Так, если глинистые породы внутри нефтенасыщенного песчаного коллектора (2420 -2420,4 м), продуктивность которого уменьшается с глубиной, фиксируются четкой отрицательной аномалией на диаграммах ГЗ и БК, то по показаниям ПЗ этот объект практически не выделяется. Это свидетельствует о близости скважины к его выклинке.

Для демонстрации примеров оценки размеров неоднородностей, мощность пересечений которых превышают длину ПЗ, обратимся к рис. 5.9. На приведённых диаграммах ПЗ, ГЗ и других методов в водонасыщенном коллекторе фиксируются прослой глинистых пород пониженного УС (в верхней части рассматриваемого участка разреза) и карбонатные породы относительно более высокого УС. Для вмещающей среды – коллектора характерно значение $\rho_{к0}$= 14 Омм.

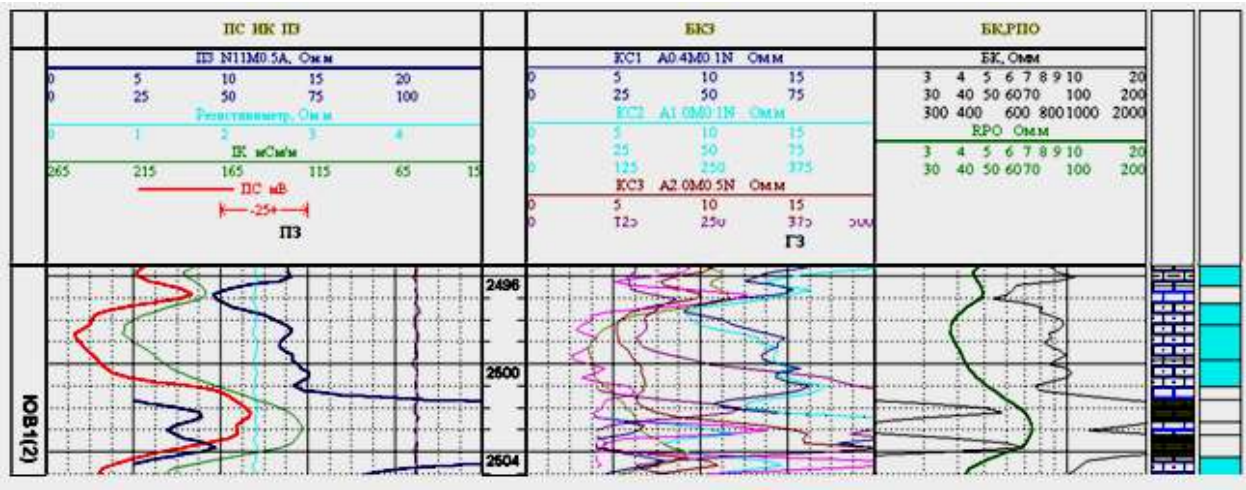


Рис. 5.9. Исходные фрагменты диаграмм КС, используемые для определения эффективного радиуса прослоев глинистых и карбонатных пород в коллекторе

Определяя аномальные значения на глинистых породах $\rho_{ка}^{пз}$= - 3,2 Омм, а $\rho_{ка}^{гз}$=-4,6 Омм и подставляя их в выражение (5.6), получим

S=5,4 м^2. При толщине глинистого прослоя 1 м его эффективный радиус приблизительно равен 0,6 м. Практически эта величина соответствует радиусу высокоомной зоны проникновения, в пределах которой глинистый прослой является аномальным объектом ограниченных размеров. Пример приведён исключительно для демонстрации техники вычислений эффективного радиуса аномального тела. В случае продуктивного коллектора полученный результат свидетельствовал бы о выклинке глинистых пород в коллекторе

На карбонатных породах значения $\rho_{ка}$ для ПЗ и ГЗ практически одинаковы. Поэтому без вычислений можно полагать, что прослой в коллекторе известняков имеет условно $R = \infty$, то – есть это тело имеет значительное распространение в разрезе.

В заключение можно отметить, что рассмотренные методики дают возможность лишь приблизительно оценить размеры непроницаемых неоднородностей в коллекторе. И, тем не менее, такие оценки представляют несомненный интерес, и их проведение во многих случаях снимает неопределённость относительно структуры разведываемых толщ коллекторов, что особенно важно для их продуктивной части.

Необходимо также подчеркнуть целесообразность изучения методами КС неоднородных коллекторов в более крупном масштабе, чем это часто принято на практике, что позволит более точно оценивать степень значительности неоднородностей.

6. Определение характера насыщения маломощных пластов – коллекторов

6.1 Предпосылки решения задачи

При малой (меньше 2 м) мощности перспективных на углеводороды пластов стандартные методы (ИК, ВИКИЗ), требующие применения относительно больших зондов, часто не позволяют уверенно определить характер насыщения изучаемых коллекторов.

Предпосылкой для определения решения задачи является различие по размерам относительно высокоомных зон в коллекторах

вблизи скважины, вскрывшей пласт. В случае водонасыщенного коллектора высокоомная часть пласта соответствует только зоне проникновения (ЗП) в пласт пресного бурового раствора, диаметр которой $D_{зп}$ не превышает 1-4 м, а её удельное сопротивление равно $\rho_{зп}$. За пределами ЗП коллектор насыщен минерализованной водой и его удельное сопротивление $\rho_{пв}$ значительно ниже чем в зоне проникновения. . У нефтегазонасыщенного коллектора ЗП (с $\rho_{зп}$) и, расположенных за ней неизменённых пород с углеводородами (с $\rho_{пн}$), электропроводности близки. Поэтому диаметр высокоомного тела $D_{нг}$ в этом случае значительно превышает типичные для зоны проникновения размеры. Модели для этих двух случаев показаны на рис. 6.1.

Как показано в разделе 5, можно по показаниям одноразмерных потенциал- и градиент- зондов небольшой длины определить размеры геологического тела вскрытого скважиной при условии его отличия по проводимости от вмещающих горных пород. В рассматриваемой модели предполагается, что вмещающие коллектор глинистые отложения близки по электропроводности водонасыщенной части коллектора.

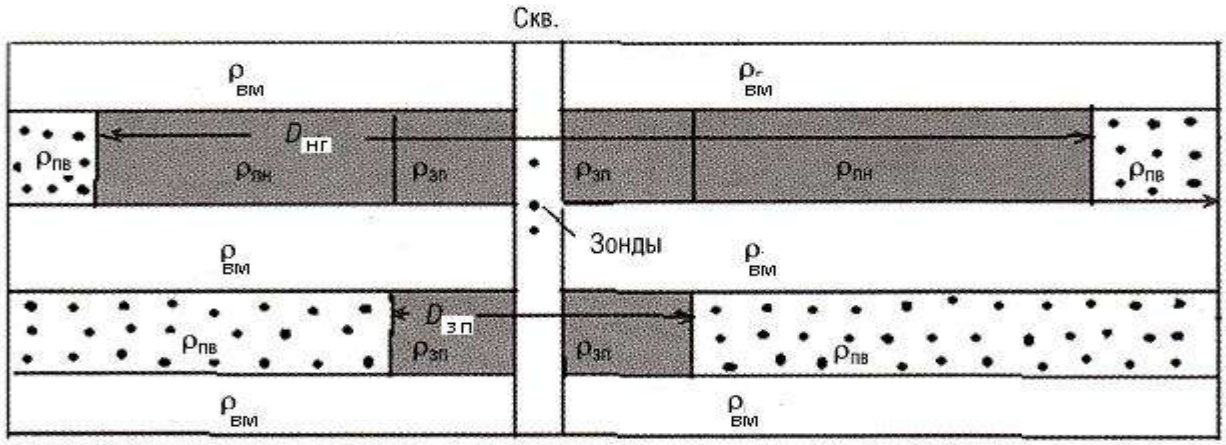
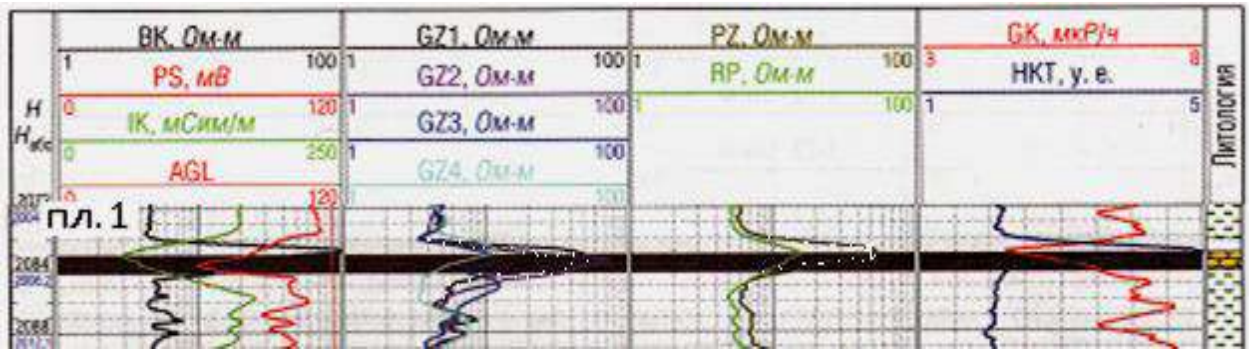


Рис.6.1. Геоэлектрическая модель разреза, содержащего нефтегазонасыщенный и водонасыщенный пласты-коллекторы среди вмещающих пород и отличающиеся размерами высокоомных зон, связанных с наличием зоны проникновения с $\rho_{зп}$ (только у водонасыщенного коллектора) и зоной нефтегазонасыщения с $\rho_{пн} \approx \rho_{зп}$

Следовательно, выполняя измерения кажущегося сопротивления одноразмерными потенциал - и градиент – зондами и вычисляя аномальные составляющие можно, как показано в разделе 5, определить по (5.6) значение площади S высокоомной зоны в коллекторе. Затем вычисляются радиус R или диаметр D этой зоны ($D \approx \sqrt{2S/\pi}$), по величине которой и делается вывод о характере насыщения коллектора. Обычно диаметр высокоомной зоны проникновения водонасыщенного пласта – коллектора не превышает 4 м, тогда как у нефтегазонасыщенного пласта такой диаметр высокоомного тела значительно больше.

6.2 Примеры из практики

В качестве примера применения рассмотренной методики обратимся к опубликованным данным по изучению коллекторов Самотлорского месторождения [9]. Характер насыщения здесь определялся по измерениям большого комплекса методов ГИС, среди которых были диаграммы полуметрового потенциал-зонда (PZ) и градиент-зонда размером 0,45 м (GZ1). Фрагменты разрезов с пластами-коллекторами (песчаники среди глинистых пород) и диаграммы комплекса ГИС приведены на рис.6.2.



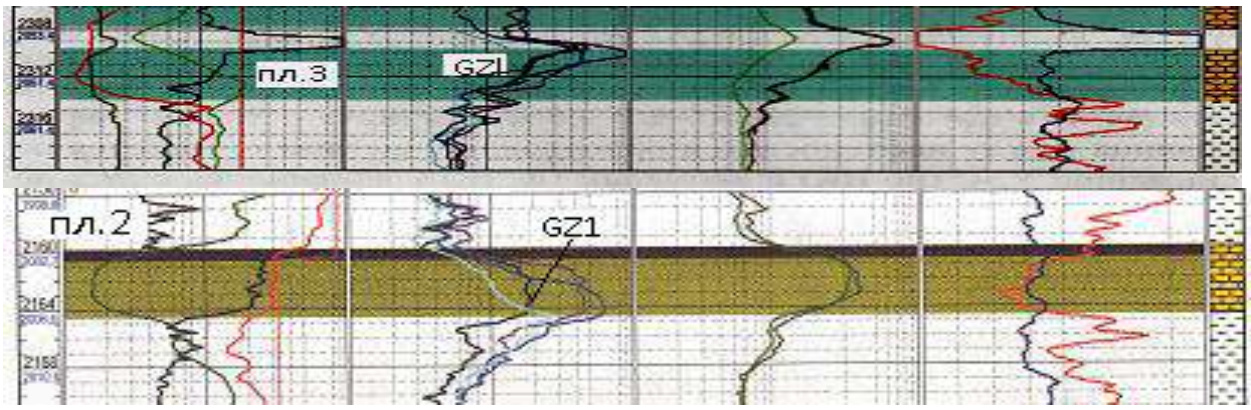


Рис.6.2. Диаграммы методов ГИС на пластах с различным характером насыщения коллекторов, в том числе диаграммы GZ1 и PZ, которые использованы для применения рассматриваемой методики

Рассмотрим три примера. Для каждого из них в средней части пласта - коллектора по диаграммам зондов определены исходные характеристики удельного сопротивления внутри коллектора и в контактирующих с ним вмещающих породах. При существенном различии свойств перекрывающей и подстилающей коллектор толщ вычислены граничные значения удельного сопротивления вмещающей среды, которое использовалось для определения нормального поля $\rho_{к0}$. Проведены соответствующие вычисления по алгоритмам приведённых выше с оценкой размеров высокоомной зоны исследуемых пластов. Исходные и результативные данные обобщены в таблице 6.1. Помимо величины S дана оценка диаметра высокоомной зоны *D*. Опыт показывает, что для нефтегазонасыщенных пластов большого размера, поскольку реальные условия не строго соответствуют теоретическим моделям и точность измерений не идеальна, возможны случаи, когда знаменатель в (5.6) не только равен нулю, но даже может быть отрицательным. Физически это не имеет смысла но, тем не менее, данный факт является признаком больших размеров изучаемого тела.

Таблица 6.1

Результаты обработки диаграмм КС зондов с целью определения характера насыщения пластов-коллекторов

Зонды пласты		GZ1			PZ		Результаты			
№ пл.	h, м	$\rho_{к0}$ Ом м	$\rho_{кт}$ Ом м	m	$\rho_{к0}$ Ом м	$\rho_{кт}$ Ом м	U^0 Ом	S $м^2$	D м	Насыщение
1	1,8	5,5	50	-0,12	6	55	0,015	22600	85	нефть
2	4	3 и 7 гр 4,2	20	-0,26	5 и 10 гр 6,6	31	0,04	4300	37	Нефть + пресн. вода
3	4,2	40 и 7 гр 12	20	-1,5	70 и 10	23	1,47	2,6	1,3	Вода минерализ.

Первый из рассмотренных пластов по комплексу методов ГИС классифицирован как нефтеносный. К аналогичному выводу приходим после оценки диаметра высокоомной зоны исследуемого коллектора, которая составляет 85 м.

Пласт №2 интересен тем, что помимо нефти большая его часть насыщена пресной водой из нагнетательной скважины. Вода относительно высокоомна и поэтому по свойствам пласт выделяется как единое целое. В связи с этим диаметр высокоомной зоны хотя и меньше, чем у пласта №1, но достаточно большой-37м. Это исключает вариант насыщения минерализованной пластовой водой.

Пласт №3 имеет существенно различные вмещающие породы в кровле и подошве. Перекрывающие коллектор плотные известняки имеют удельное сопротивление превышающее пластовое. Тем не менее уверенно определяется малый диаметр высокоомной зоны коллектора (1,3м) типичный для ЗП. Этот факт позволяет подтвердить установленное по комплексу ГИС водонасыщение коллектора пластовой минерализованной водой.

7. Подсчёт запасов

7.1 Построение карт структурных и подсчётных параметров

В последнее время в связи с внедрением компьютерных технологий, процедура геометризации залежи существенно упростилась. В практике подсчёта запасов и проектирования разработки месторождений стали широко использоваться карты различных подсчётных параметров .

Перечень основных карт моделируемой залежи включает в себя набор следующих карт:

- структурные карты по кровле и подошве залежи;
- эффективных толщин коллектора;
- значений пористости и проницаемости;
- характеристик неоднородности пласта;
- нефтегазонасыщенности;
- линейных запасов углеводородов по пласту;

В отдельных случаях этот набор может быть дополнен построением кубов отдельных параметров (литологических, фильтрационно-ёмкостных и др.), позволяющих представить распределение демонстрируемых параметров в объёме.

Построение требуемого набора карт осуществляется с применением вычислительной техники и специального программного обеспечения, но может быть реализовано вручную. Распространённым способом построения карт является метод непересекающихся треугольников ячеек. При этом площадь наблюдений разбивается на треугольники, в вершинах которых имеются значения картируемого параметра. Исходными являются наблюдённые данные, соответствующие устьям вертикальных скважин (пример на рис. 3.5). Компьютерные технологии позволяют получить более мелкую сеть треугольников, в узлах которых значения параметра получаются с помощью линейной интерполяции. В результате площадь представляет «лоскутное одеяло» из совокупности треугольников. Размеры треугольников должны быть по возможности одинаковыми. Каждый из треугольников имеет 3 значения картируемого параметра, что позволяет охарактеризовать площадь треугольника средним значением, которое записывается в центр треугольника (см. рис.3.5). Эти значе-

ния используются для построения системы изолиний данного параметра.

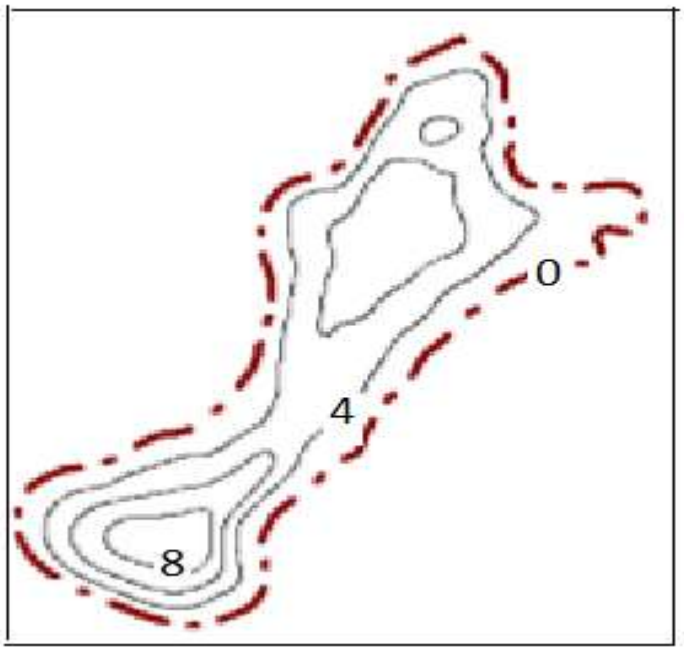


Рис. .1. Пример карты эффективной нефтенасыщенной толщины в м. для нефтяной залежи, используемой для подсчета запасов углеводородов [9]

На рис. 7.1 приводится пример карты эффективной нефтенасыщенной толщины небольшой залежи, положение которой в пределах пласта песчаников показана на структурной карте рис. 2.6. Этот параметр в каждой скважине определяется как толщина продуктивного пласта от подошвы ВНК до кровли. При наличии газовой насыщенности отдельно определяются эффективные газонасыщенные толщины? и строится соответствующая карта.

7.2 Подсчёт линейных и объёмных запасов

В результате интерпретации комплекса диаграмм ГИС по каждой скважине с нефтегазонасыщением известны эффективные мощности газонасыщенной $h_г$ и нефтенасыщенной $h_н$ части пласта – коллектора. Определены также коэффициенты пористости $K_п$, газонасыщенности $K_г$ и нефтенасыщенности $K_н$. Эти данные позволяют вычислить для каждой скважины линейные запасы газа $q_г$ и нефти $q_н$. Они представляют произведение трёх вышеупомянутых параметров. Например, линейные запасы нефти в районе i - ой скважины

$$q_{нi} = h_{нi} K_{пi} K_{нi}. \qquad (7.1)$$

В итоге параметры линейного нефтенасыщения (газонасыщения) q приписываются устьям соответствующих скважин. Для реализациии способа треугольников в центре каждой из N треугольных ячеек обозначается среднее значение $q_{срn}$ для n – ой ячейки из трёх

скважин (см. рис.3.5). По этим данным может быть построена карта линейной нефтенасыщенности.

Для определения запасов углеводородов Q в залежи необходимо знать площади для каждой треугольной ячейки т.е s_n. Тогда вычисляя произведение $q_{срn}s_n$ и их сумму для всех N ячеек, получим искомую величину Q:

$$Q = \Sigma\, q_{срn}\, s_n. \qquad (7.2)$$

Целесообразно оценить также извлекаемые запасы нефти $Q_{изв}$ при известном среднем коэффициенте извлечения нефти $\beta_{извл}$, который определяется исходя из опыта разработки месторождений подобного типа. Очевидно $Q_{изв} = Q\beta_{извл}$. Типичные значения для коэффициента извлечения 0,6 – 0, 7.

7.3. Оценка погрешности подсчёта запасов

Достоверность определения подсчётных параметров, а следовательно, запасов нефти и газа по данным промысловой геофизики зависит от многих факторов, которые можно объединить в две группы: полнота и качество исходной промыслово – геофизической информации; б) оптимальность интерпретации данных измерений, используе- мых при определении подсчётных параметров.

Комплекс ГИС на всех скважинах изучаемой залежи должен обеспечить получение всей информации для определения эффективной мощности, коэффициентов пористости и нефтегазонасыщения. Качество диаграмм ГИС должно соответствовать техническим условиям проведения измерений, т. е позволять провести количественную геофизическую и геологическую интерпретацию диаграмм. Например, определение границ коллекторов, мощность непроницаемых прослоек в них должно контролироваться несколькими методами.

Оптимальная интерпретация обеспечивается при выполнении следующих условий: 1) интерпретатор правильно определил тип коллектора в изучаемом геологическом разрезе; 2)выбранная для решения обратной задачи система уравнений, связывающая геофизические параметры и искомые подсчётные параметры, соответствует данному типу коллектора; 3) парные и многомерные петрофизические связи, используемые при индивидуальной интерпретации,

отвечают критериям надёжности и получены на представительном фактическом материале, достаточно полно характеризующем изучаемый объект.

Погрешности определения подсчётных параметров выполняются различными способами и зависят от типа разреза и вида определяемого параметра. Одним из критериев оценки качества результатов измерений является сходимость основного и повторных замеров измеряемой характеристики. Оценка воспроизводимости скважинных измерений получается использованием статистического анализа многократных исследований.

Ограничимся рассмотрением одного из подходов к оценке погрешности определения подсчёта запасов. Так как определение в м эффективной мощности продуктивных коллекторов ($h_{эф}$) может контролироваться несколькими (n) методами ГИС, то для каждой из группы скважин можно вычислить его среднее значение $h_{эф\ ср}$, которое близко к точному значению. Стандартное или среднеквадратичное отклонение от среднего S_h при ограниченном комплексе методов вычисляется по формуле

$$S_h = \sqrt{[\sum_0^n (h_{эф\ ср} - h_{эф\ i})2]/(n-1)} \qquad (7.3)$$

Затем для каждой скважины вычисляется относительная погрешность δ_h определения $h_{эф}$: $\delta_h = S_h / h_{эф\ ср}$ и находится среднее значение для выбранной группы скважин.

При определении коэффициента пористости по скважинным измерениям $K_{п\ скв}$ обычно использует зависимость между физической характеристикой, например плотностью σ, и пористостью. В интервале наиболее типичных значений $K_{п\ скв}$ по группе скважин, где в тех же пересечениях коллектора имеются определения в лаборатории пористости по керну, последние приводятся к условиям скважины. Обычно на глубине особенно для глинистых коллекторов значения пористости несколько меньше, чем они оказываются при подъёме керна на дневную поверхность. Для среднеглинистых коллекторов ($\eta_{гл} \approx 0{,}5$) для приведения лабораторных измерений к условиям в скважине на глубине $H_{км}$ по В. М. Добрынину лабораторные определения пористости необходимо уменьшить на величину $\Delta K_{п\ (\%)} = 0{,}015 H \cdot K_{п\ керн\ (\%)}$. Затем с учётом исправленных значений $K_{п\ керн}$ вычисляют среднеквадратичное отклонение $S_{Kп}$ по n измерениям

$$S_{Kn}=\sqrt{[\sum_0^n(K_{\text{керн } i}\ -K_{\text{скв } i}\ )2]/(\text{n}-1)}. \qquad (7.4)$$

Для определения искомой относительной погрешности определения $\delta_{\text{Кп}}$ ориентируются на среднее значение исправленных измерений в выбранном интервале $K_{\text{п керн}}$. Вычисляют значение $\delta_{K\text{п}}= S_{K\text{п}}/ K_{\text{п керн ср}}$, которое и рассматривается как относительная погрешность определения пористости по данным ГИС.

Аналогичным образом вычисляется относительная погрешность определения коэффициента нефтенасыщенности $\delta_{K\text{н}}$ (газонасыщенности) по данным ГИС. В этом случае нет необходимости исправлять данные измерений на кернах. Результаты вычисления относительных погрешностей трёх подсчётных параметров позволяют вычислить относительную погрешность определения величины объёма запасов δ_Q, которая рассматривается как функция. В случае произведения трёх аргументов $\delta_Q= \delta_h+ \delta_{K\text{п}}+ \delta_{K\text{н}}$. Следовательно, вероятное значение искомого объёма Q объективней представить в виде некоторого интервала: $Q\pm\Delta Q$, где $\Delta Q= \delta_Q Q$.

7.5 Контроль за разработкой резервуаров в эксплуатационный период

В период разработки резервуара в исходную геолого - геофизическую модель этого объекта последовательно вносятся изменения, связанные с извлечением углеводородов. Одна из главных задач геофизических исследований заключается в контроле за изменением положения газо- и водонфтяных контактов в скважинах и в пространстве. Роль сейсморазведки при решении этой задачи рассмотрена в 2.7.

8. Заключение

Геолого-геофизические модели строятся на всех стадиях геологоразведочных работ: поисково-оценочной, разведочно-эксплуатацион-ной, эксплуатационной. При этом учитываются особенности этапа работ и требования к соответствующей информации.

Так, если на первом из них подсчёт запасов проводится по категориям C_1 и преимущественно C_2, то на этапе эксплуатационной разведки данные должны отвечать требованиям категорий В и А. Это достигается сгущением сети скважин и применения детальной корреляции всего фонда пропластков с целью выявления путей фильтрации по проницаемым отложениям для полного вовлечения их в разработку.

Для проектирования и реализации добычи углеводородов создаётся фильтрационная модель месторождения. Цифровая фильтрационная модель представляет объект в виде двухмерной или трёхмерной сети ячеек, каждая из которых характеризуется набором идентификаторов и параметров, как и геологическая модель. Дополнительно приводятся динамические характеристики пластовых свойств и процессов. Это данные о конструкции скважин, дебитах фаз, данные о пластовом и забойном давлении и др.

Помимо наличия дополнительных параметров фильтрационная модель может отличаться от геологической модели большей схематизацией строения, объединением нескольких геологических объектов в единый объект моделирования. Упрощение геометрического построения , осуществляемое в фильтрационной модели , обусловлено необходимостью проводить компьютерные расчёты пластовых процессов и показателей разработки при экономически допустимых затратах машинного времени. Роль промысловой геофизики сводится к обеспечению данных о динамических характеристиках пластов (проницаемость, дебиты-расходы, пластовое и забойное давление и др.), получаемых с применением специальных методик [14, 15 и др.].

В геолого – геофизическую и фильтрационную модели в процессе эксплуатации месторождения вносятся коррективы по результатам ГИС в добывающих скважинах. Эти исследования, объединяемые как контрольные за разработкой нефтяных и газовых месторождений, позволяют получить следующие данные:

- изменение положения ВНК и ГНК в скважинах;

- выделение обводнённых интервалов внутри продуктивных пластов

- текущие карты равного нефтегазосодержания,

- текущий дебит в добывающих скважинах,

- состав флюида в стволах скважин,

- пластовое давление и др.

Технологии геолого – геофизического моделирования непрерывно совершенствуются и имеют специфические особенности на различных объектах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. *Жемжурова З. Н., Чекунова В. А., Черноглазов В. Н.* Практикум по геолого – геофизическому моделированию разрабатываемых залежей нефти и газа: Учебн. пособие. М.: ИЦ РГУ нефти и газа, 2012. – 206 с.
2. *Золоева Г. М., Денисов С. Б., Билибин С. И.* Геолого - геофизическое моделирование залежей нефти и газа: Учебн. пособие. – 2 – е изд. доп. и перераб. – М.: МАКС Пресс, 2008. 212 с.
3. *Лобусев А. В.* Геолого – промысловые основы моделирования залежей нефти и газа. Учебник. М: ИЦ РГУ нефти и газа, 2010. – 247 с.

Дополнительная

4. *Бембель Р. М., Мегеря В. М., Бембель С. Р*. Геосолитонная концепция образования месторождений углеводородов //Геофизика, 50 лет «Хантымансийскгеофизике». 2001, С. 50-53.
5. Бондарев В. И. Сейсморазведка: Учебник для вузов. Екатеринбург: Издательство УГГУ, 2007. 690 с.
6. *Воскресенский Ю. Н.* Полевая геофизика: Учебн. для вузов. – М. ООО « Издательский дом Недра». 2010. – 479 с.
7. *Дахнов В. Н.* Интерпретация результатов геофизических исследований скважин. Учебник для вузов. – М.: Недра.1982. – 448 с.
8. *Ковач А.* Ю., Поздеев Ж. А..Выделение обводнённых коллекторов по данным ГИС в открытом стволе на примере Самотлорского месторождения//НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 2013. Вып.11 (233).
9. *Методические указания* по созданию постоянно действующих геолого – технологических моделей нефтяных и газонефтяных месторождений (часть 1. Геологические модели). – М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2003. – 164 с.

10. *Перевертайло Т. Г.*Формирование 3D – геологических моделей месторождений нефти и газа в среде программного комплекса Petrel. Томск: Изд. – во Томского политехнического университета, 2010. – 93 с.
11. *Сапожников В. М.* Диск, полуплоскость и плоскость с вырезом, имеющие предельную или конечную электропроводность, в поле точечного источника тока // Известия Уральской государственной горно – геологической академии. Сер. : Геология и геофизика. – 1996. Вып. 5. С. 111 – 115
12. *Сапожников В. М.* О количественной связи между поверхностью и сопротивлением заземления //Вопросы разведочной геофизики: Тр. Свердловского горного ин – та. 1968. Вып. 54. С. 187 – 189.
13. *Сапожников В. М., Мишедченко И. В.* О степени подобия аномальных электрических полей, возбуждаемых неоднородным полем, и практика интерпретации аномалий// Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Материалы 29 – й сессии Международного семинара им. Д. Г. Успенского. Екатеринбург: УГГ, 2002. С. 255 – 259.
14. *Сапожников В. М.* Интерпретация данных геофизических исследований скважин :Учебн. пособие, Екатеринбург: Изд. – во УГГУ, 2014. – 153 с.
15. *Сковородников И. Г.* Геофизические исследования скважин:Учебн. пособие, Екатеринбург: Институт испытаний, 2009. – 421 с.

Оглавление

Введение……..3

1. Углеводородное сырьё и геологические структуры продуктивных горизонтов и пластов - коллекторов
…….4
1.1. Нефть и природные горючи газы……4
1.2 Концепции образования месторождений нефти и газа……4
1.3. Формации и фации, благоприятные для нефтегазообразования и нефтегазонакопления……..6
1.4. Природные резервуары, ловушки и залежи нефти и газа…….13
1.5. Исходные данные и этапы построения геолого-геофизической модели нефтегазовой залежи……...15
2. Использование сейсморазведки при изучении нефтегазовых резервуаров
2.1. Предпосылки применения сейсмических исследований при геолого-геофизическом моделировании…….....17
2.2. Интерпретация сейсмических данных……19
2.3. Корреляция сейсмических горизонтов, выявление тектонических нарушений……22
3. Использование данных ГИС при формировании геолого-геофизической модели залежи нефти и газа……...24
3.1.Данные ГИС по отдельным скважинам……..24
3.2. Подготовка данных ГИС для интерпретации сейсморазведки…….28
3.3 Корреляция разрезов скважин
……..29
4. Палеотектонический, седиментационный и фациальный анализ……36
4.1. Палеотектонический анализ……36
4.2. Седиментационный анализ……38
4.3 Фациальный анализ……40
5. Изучение непроницаемых неоднородностей продуктивных терригенных коллекторов методом КС……
……46 5.1Модели неоднородно-

стей……46 5.2 Теоретические предпосылки изучения маломощных неоднородностей…47
5.3 Обоснование методики оценки размеров неоднрородностей …….51
5.4 Практические примеры……54 **6**.Определение характера насыщения маломощных пластов – коллекторов..57
6.1 Предпосылки решения задачи…….....57
6.2 Примеры из практики…….....58
7. Подсчёт запасов…….....61
7.1 Построение карт структурных и подсчётных параметров……61 7.2 Подсчёт линейных и объёмных запасов…….62
7. 3 Оценка погрешности подсчёта запасов…….....63
8.Заключение……6
5 Список литературы……..67

Учебное издание

САПОЖНИКОВ ВАДИМ МИХАЙЛОВИЧ

ГЕОЛОГО _ ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАЛЕЖЕЙ НЕФТИ И ГАЗА

Учебное пособие

Редактор издательства *Л. В. Устьянцева*
Компьютерная верстка *Н. Г. Сайгиной*

Подписано к печати
Бумага писчая. Формат 60х84 1/16
Печать на ризографе. Гарнитура Times New Roman
Печ. Л. Изд. Л. Тираж 100 Заказ №

Издательство УГГУ
620144, г. Екатеринбург, Куйбышева, 30
ФГБОУ ВПО «Уральский государственный горный университет»
Отпечатано с оригинал – макета
В лаборатории множительной техники УГГУ

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Уральский государственный горный университет»

Н. В. Блинкова, Н. С. Земцов

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИН

Методические указания
к лабораторным и практическим работам по дисциплине «Геофизические методы исследования горизонтальных скважин» для студентов специальности 2*1.05.03 Технология геологической разведки*

Екатеринбург
2020

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Уральский государственный горный университет»

ОДОБРЕНО:
Методической комиссией
Факультета геологии и геофизики УГГУ
20 МАРТА 2020 г.
Председатель комиссии
_____ проф. Бондарев В. И.

Н. В. Блинкова, Н. С. Земцов

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИН

Методические указания
к лабораторным и практическим работам
по дисциплине «Геофизические методы
исследования горизонтальных скважин»

Издание УГГУ Екатеринбург, 2020

Б 69

Рецензенты: *Иголкина Г. В.*, д-р геол.-мин. наук, зав. лабораторией промысловой геофизики (Институт геофизики УрО РАН);
Скобелев А. Н., канд. техн. наук, главный геолог, (группа компаний «НЕДРА»).

Методические указания рассмотрены на заседании кафедры геофизики 5 МАРТА 2020 г. (протокол № 12) и рекомендованы для издания в УГГУ.

Блнкова Н. В., Земцов Н. С.

Б 69 ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИН: методические указания / Н. В. Блинкова, Н. С. Земцов; Урал. гос. горный ун-т. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2020. – 71 с.

Методические указания содержат семь практических работ. В каждой работе имеется описание геофизической аппаратуры для исследования горизонтальных скважин в процессе бурения и на этапе их исследования после бурения. В работах приводятся планы заданий для анализа полевых материалов (каротажных диаграмм), полученных с этой аппаратурой (АМК «ГОРИЗОНТ», АК «АЛМАЗ-2И», АМАК «Обь», СБК «АМАК», АМК «Горизонталь»). Две работы включают в себя интерпретацию данных метода инклинометрии в горизонтальных скважинах с использованием программного обеспечения станции геолого-технологических исследований «Мега АМТ» и построения этих скважин в трехмерном пространстве, а также построение корреляционного разреза по одному из месторождений Западной Сибири с использованием геофизических данных горизонтальных скважин.

Выполнение этих работ позволит подготовиться студентам к производственной и преддипломной практикам, которые они проходят, в основном, на месторождениях Западно-Сибирской нефтегазовой провинции.

.

© Блинкова Н. В., Земцов Н. С., 2020
© Уральский государственный горный университет, 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 5
Работа 1. АППАРАТУРНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС «ГОРИЗОНТ-90» 6
1. Состав и краткое описание 6
2. Основные технические характеристики 6
3. Автономный скважинный прибор 8
4. Прочие конструктивные особенности комплекса 14
Задание 15
Контрольные вопросы 15
Работа 2. АВТОНОМНЫЙ КОМПЛЕКС «АЛМАЗ-2И» 16
1. Состав и краткое описание 16
2. Основные технические характеристики 18
3. Устройство и работа комплекса 21
Задание 25
Контрольные вопросы 25
Работа 3. АППАРАТУРНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ АВТОНОМНЫЙ КОМПЛЕКС «ОБЬ» 26
1. Состав и краткое описание 26
2. Основные технические характеристики 26
3. Устройство и работа комплекса 27
4. Прочие особенности комплекса 33
Задание 34
Контрольные вопросы 35
Работа 4. СТАНЦИЯ БЕЗКАБЕЛЬНОГО КАРОТАЖА СБК «АМАК» 36
1. Состав и краткое описание 36
2. Геохимическая подсистема, предназначенная для проведения газового каротажа 37
3. Прочие компоненты комплекса 40
Задание 42
Контрольные вопросы 43
Работа 5. АВТОНОМНАЯ ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ СИСТЕМА «ГОРИЗОНТАЛЬ» 44
1. Состав и краткое описание 44
2. Основные технические характеристики 46
3. Устройство и работа комплекса 49
4. Проведение геофизических исследований скважин (ГИС) 56
Задание 57
Контрольные вопросы 57

Работа 6. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ ИНКЛИНОМЕТРИИ
В ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИНАХ 58
1. Краткое описание 58
Задание 63
Контрольные вопросы 63
Работа 7. ПОСТРОЕНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННОГО РАЗРЕЗА
ПО ДИАГРАММАМ АМК «ГОРИЗОНТ» 64
1. Краткое описание 64
Задание 68
Контрольные вопросы 68
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 69

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее эффективными и прогрессивными технологиями в нефтедобывающей отрасли в настоящее время является переход от бурения одиночных скважин к бурению и широкомасштабному промышленному освоению горизонтальных, разветвленно-горизонталь-ных, многозабойных горизонтальных скважин, а также боковых стволов из старого фонда скважин. За последние годы в горизонтальных скважинах опробован целый ряд технологий бурения забойными телеметрическими системами с гидравлическим, электромагнитным и комбинированным каналами связи, а также исследования скважин на этапе «после бурения» применение аппаратурно-методических комплексов с различными способами доставки аппаратуры на забой. Такими способами является доставка с помощью бурильных труб, гибких пластиковых труб «COILED TUBING» (в переводе с англ. – гибкая труба), жёсткого геофизического кабеля и др. [2, 11, 12, 15, 16, 17]. В методических указаниях описываются примеры такой аппаратуры, как аппаратурно-методический комплекс (АМК) «ГОРИЗОНТ-90», автономный комплекс (АК) «АЛМАЗ-2И», аппаратурно-методический автономный комплекс (АМАК) «Обь», станция бескабельного каротажа (СБК) «АМАК», аппаратурно-методический комплекс (АГС) «Горизонталь».

В методических указаниях содержатся семь работ, пять из которых по аппаратуре, шестая по интерпретации данных инклинометрии в горизонтальных скважинах, седьмая – по построению корреляционного разреза по диаграммам АМК «ГОРИЗОНТ».

Работа 1. АППАРАТУРНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС «ГОРИЗОНТ-90»

1. Состав и краткое описание

АМК «ГОРИЗОНТ-90» содержит в своем составе скважинный прибор ПСК-3, устройство сопряжения, персональный компьютер 386, 486 или Pentium, термоплоттер KST-216-8MP01-KICC, программное и методическое обеспечение, глубиномер, индикатор нагрузки талевого каната буровой лебедки, вспомогательное оборудование [3, 4, 5, 7, 8, 9, 10].

2. Основные технические характеристики

АМК «ГОРИЗОНТ-90» обеспечивает измерение и обработку следующих параметров: кажущееся электрическое сопротивление (КС) – 0–2000 Ом·м; потенциал собственной поляризации (ПС) – ±0,5 В; уровень естественного гамма-излучения (ГК) – 0–50 мкР/ч; поток нейтронов (НК1, НК2) – до 250000 имп/мин; уровень радиационного гамма-излучения (НГК) – 0–200 мкР/ч; зенитный угол наклона скважины, град. – (0–180)±0,2; азимут наклона скважины, град. – (0–360)±1.

Конструктивные данные скважинного прибора: длина – 7720±100 мм; диаметр – 90 мм; присоединительная резьба для бурового инструмента – З-76; диаметр проточки под элеватор – 73 мм; промывка скважины через переводник в верхней части скважинного прибора.

Условия эксплуатации скважинных приборов: диаметр исследуемых скважин – не менее 110 мм; давление на забое – не более 60 МПа; температура окружающей среды – не более 80 °С; конструкция скважинного прибора выдерживает осевую сжимающую и растягивающую нагрузку 5-8 тонн; радиус искривления скважины – не менее 40 м; для получения качественных материалов измерения в скважине рекомендуется проводить на аварийном приводе буровой лебедки при скорости 90, 180 или 360 м/ч.

При использовании АМК «ГОРИЗОНТ-90» геофизические измерения в скважине могут проводиться в широком диапазоне изменения удельного сопротивления промывочной жидкости (0,05–5 Ом·м).

В целях безопасности работы с источником нейтронов предусмотрена возможность его извлечения из скважины в случае аварии. Для этого источник устанавливается в специальном контейнере в верхней части скважинного прибора.

Непрерывное время работы скважинного прибора в режиме измерений – не менее 7 часов. Дискретность измерения и регистрации в блоке памяти всех параметров в цифровой форме – 2 сек. В связи с ограниченной емкостью источников питания и блока хранения информации в скважинном приборе предусмотрено включение измерительной схемы с задержкой до 19 часов на время спуска до интервала исследований. Дискретность установки времени задержки – 4,5 мин.

Глубиномер и датчик нагрузки рассчитаны для работы с талевым канатом буровой лебедки диаметром 25–28 мм. Погрешность измерения глубины в интервале каротажа не более 0,1 %. Дискретность измерения перемещения бурового инструмента – не более 4 мм.

3. Автономный скважинный прибор

Общий вид скважинного прибора показан на рис. 1.1. Корпус скважинного прибора выполнен из немагнитного сплава. На его наружную поверхность до диаметра 90 мм нанесено изоляционное покрытие, на котором установлены токовые и измерительные кольцевые электроды. Эти электроды с помощью проводов, проложенных в теле изоляционного покрытия, электровводов и разъема в нижней части прибора соединяются с измерительной схемой электрического каротажа. В верхней части корпуса прибора имеется стальной переводник, предназначенный для соединения с колонной бурильных труб с помощью замковой резьбы З-76. Переводник имеет отверстия для прохождения промывочной жидкости. Внутри переводника устанавливается герметичный контейнер с радиоактивным источником, который в аварийной ситуации может быть извлечен из скважины.



Рис. 1.1. Общий вид скважинного прибора

Внутри охранного корпуса установлены шасси с электронной измерительной схемой, выполненной в виде конструктивно законченных модулей. Модули между собой соединены с помощью разъемов и накидных гаек. С целью предотвращения повреждений измерительных схем каждый модуль закрыт цилиндрическим защитным кожухом.

Прибор содержит шесть модулей: модуль НК, батарея питания, модуль центрального процессора, модуль ГК, модуль инклинометра и модуль электрического каротажа.

Структурная схема, приведенная на рис. 1.2, дает общее представление о принципе работы скважинного прибора. В модуле центрального процессора (МЦП) напряжение батареи питания, состоящей из химических источников тока, преобразуется в ряд напряжений, необходимых для работы электронных схем. Нормальное функционирование скважинного прибора осуществляется под управлением процессора, выполненного на базе однокристальной микро-ЭВМ К1816ВЕ39. МЦП по шине управления формирует сигналы, обеспечивающие синхронную работу остальных модулей прибора. Обмен данными МЦП со всеми модулями производится по 8-разрядной шине данных. По командам, вырабатываемым в МЦП, периодически через две секунды производится опрос датчиков и измерение всех параметров. В модуле электрического каротажа (МЭК) за счет коммутации токовых и измерительных электродов обеспечивается измерение кажущегося сопротивления (КС) тремя симметричными градиент-зондами, тока зондирования и потенциала собственной поляризации (ПС). Значения измеренных параметров передаются по шине данных в МЦП. В модулях ГК (МГК) и НК (МНК), сформированные из гамма-квантов радиоактивного излучения, электрические импульсы накапливаются в счетчиках в течение двух секунд и считываются в МЦП. В модуле инклинометра (ИНКЛ) через каждые две секунды регистрируются три составляющие магнитного поля Земли и поля силы тяжести, по которым затем вычисляются зенитный угол и азимут наклона скважины. В МЦП измеренная информация дополнительно обрабатывается, а затем записывается в память блока регистрации информации (МРИ), емкость которого составляет 512 Кбайт.

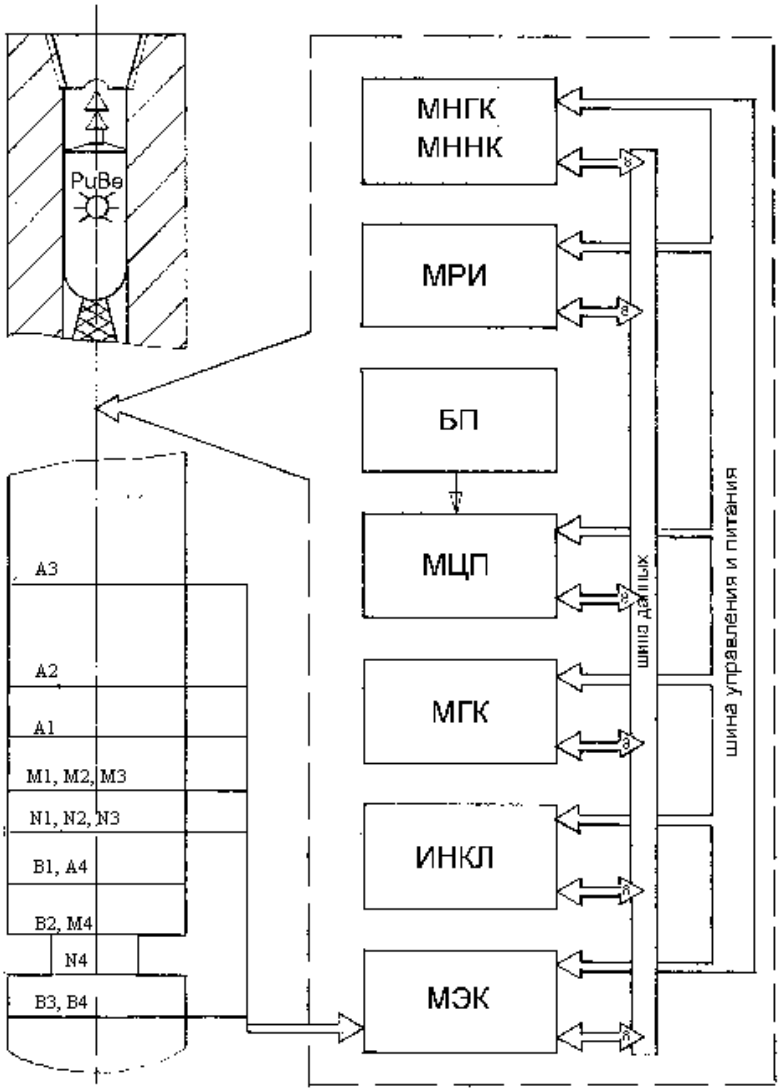


Рис. 1.2. Структурная схема скважинного прибора

Этой емкости достаточно для регистрации информации скважинным прибором в течение семи часов. МРИ в отличие от предыдущих модификаций АМК «ГОРИЗОНТ» размещен в МЦП. После заполнения МРИ происходит автоматическое выключение скважинного прибора.

Вышеуказанные модули можно охарактеризовать следующими параметрами:

• *Модуль центрального процессора* (*МЦП*)

МЦП выполнен на базе ОЭВМ серии К1816ВЕ39. Предназначен для управления работой остальных модулей скважинного прибора, регистрации информации в блоке памяти (512 кбайт) и обмена информацией с наземной частью АМК «ГОРИЗОНТ-90».

• *Модуль ГК и НК*

Радиоактивный каротаж в скважинном приборе осуществляется двумя идентичными модулями: модуль гамма-каротажа (МГК), модуль нейтронного каротажа (МНК).

Модуль ГК предназначен для измерения естественного гамма-излучения горных пород. Он выполнен на базе фотоумножителя ФЭУ-74 и сцинтилляционного детектора NaJ(Tl), размером 30×70 мм. Электрические импульсы с выхода фотоумножителя после усиления и ограничения поступают на вход счетчика, где преобразуются в двоичный код. Через каждые две секунды центральный процессор обращается к модулю и считывает 16-разрядное слово с двоичного счетчика, после чего счетчик обнуляется и начинается накопление импульсов в течение следующих двух секунд, далее цикл повторяется.

Для нормальной работы фотоэлектронного умножителя необходимо стабильное напряжение около 1800 В, которое формируется с помощью высоковольтного преобразователя напряжения и стабилизатора напряжения.

Модуль нейтронного каротажа предназначен для измерения потока нейтронов двумя зондовыми установками ННК (20 и 40 см) и радиационного гамма-излучения НГК (60 см), возникающего при облучении породы потоком нейтронов.

Для регистрации потока нейтронов используются нейтронные трубки СНМ-56, а для регистрации гамма-излучения – ФЭУ-74 и сцинтилляционный детектор NaJ(Tl), размером 30×40 мм. Для защиты сцинтилляционного детектора от потока тепловых нейтронов используется экран из кадмия и бора. В остальном работа модуля НК аналогична работе модуля ГК.

• *Модуль электрического каротажа*

Для электрического каротажа в скважинном приборе используются четыре четырехэлектродных симметричных градиент-зонда:

– *A*1 0,5 *M*1 0,25 *N*1 0,5 *B*1, диаметром 90 мм;

– *A*2 0,5 *M*2 0,25 *N*2 0,5 *B*2, диаметром 75 мм;

– *A*3 1,0 *M*1 0,25 *N*1 1,0 *B*3, диаметром 90 мм;

– *A*4 1,75 *M*1 0,25 *N*1 1,74 *B*3, диаметром 90 мм.

При измерении одноименные токовые электроды *A* и *B* через коммутатор тока подключаются к генератору зондирующего тока, а соответствующие измерительные электроды *M* и *N* через коммутатор напряжения к измерительному усилителю с программно изменяющимся коэффициентом усиления.

При измерении параметра кажущегося удельного сопротивления (КС) ток зондирования, протекая по породе между токовыми электродами *A* и *B*, создает между измерительными электродами *M* и *N* переменное напряжение прямоугольной формы, амплитуда которого пропорциональна измеряемому кажущемуся удельному сопротивлению породы. Это напряжение после усиления преобразуется синхронным детектором в напряжение постоянного тока, которое через аналоговый коммутатор поступает на вход

интегрирующего аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Преобразованное в двоичный код измеряемое напряжение считывается центральным процессором с двоичного реверсивного счетчика и записывается в блок ОЗУ.

• *Модуль инклинометра*

Модуль инклинометра предназначен для одновременного измерения трех взаимно ортогональных составляющих величины магнитного поля Земли, и трех взаимно ортогональных составляющих вектора поля силы тяжести, по которым определяются зенитный угол и азимут наклона скважины. В модуле используются феррозондовые датчики магнитометра и акселерометра.

С выходов датчика акселерометра электрические сигналы, пропорциональные составляющим вектора силы тяжести, поступают через аналоговый коммутатор (АК) на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП), на выходе которого формируются цифровые коды, пропорциональные выходным напряжениям акселерометра.

С выходов датчика магнитометра электрические сигналы, пропорциональные составляющим величины магнитного поля Земли, поступают на вход времяимпульсного преобразователя (ВрИП), на выходе которого формируются цифровые коды, пропорциональные измеряемому магнитному полю. Полученные коды через магистральные приёмопередатчики (МПП) пересылаются в ЦП. После обработки считанной информации ЦП пересылает результат в модуль регистрации информации.

4. Прочие конструктивные особенности комплекса

Глубиномер

Глубиномер предназначен для измерения приращений глубины в процессе каротажа скважин. Состоит из головки, в которой размещен индукционный датчик, демпфирующего устройства, зажимного хомута, стойки, узла крепления и 4-контактного разъема.

Конструктивно головка датчика выполнена в виде двух «ш»-образных магнитопроводов, разнесенных между собой на расстояние несколько меньше шага навивки талевого каната. На магнитопроводах размещены питающая и измерительная обмотки. Вся система залита эпоксидной смолой в дюралюминиевом корпусе.

Датчик нагрузки талевого каната буровой лебедки

Датчик нагрузки предназначен для отключения счетчика глубиномера во время каротажа при отсутствии нагрузки на крюке буровой лебедки. Состоит из жесткого основания в виде балки, на концах которой закреплены два неподвижных упора для талевого

каната и один подвижный в центре, узла регулировки жесткости упорной пружины, концевого переключателя, индикатора нагрузки, 4-контактного разъе-ма и защитного кожуха.

Задание

1. Изучить технические характеристики аппаратурно-методичес-кого комплекса «ГОРИЗОНТ-90».

2. Изучить устройство скважинного прибора АМК «ГОРИЗОНТ-90» на уровне блок-схемы.

3. Проанализировать комплекс каротажных диаграмм, полученных с помощью АМК «ГОРИЗОНТ-90», и описать возможности литологического расчленения разреза этим комплексом.

4. Составить пояснительную записку.

Контрольные вопросы

1. Из каких основных блоков состоит АМК «ГОРИЗОНТ-90»?
2. Какие основные параметры измеряет и обрабатывает АМК «ГОРИЗОНТ-90»?
3. Каковы условия эксплуатации скважинных приборов?
4. Из каких устройств состоит функциональная схема модуля центрального процессора?
5. Изобразите функциональную схему модулей ГК и НК.
6. Расскажите принцип работы модуля инклинометра.
7. Изобразите функциональную схему модуля электрического каротажа.
8. Изобразите функциональную схему модуля инклинометра
9. Каков принцип работы датчика нагрузки талевого каната буровой лебедки?
10. Каково назначение устройства сопряжения?

Работа 2. АВТОНОМНЫЙ КОМПЛЕКС «АЛМАЗ-2И»

1. Состав и краткое описание

Автономный комплекс «АЛМАЗ-2И» (далее комплекс) предназначен для геофизических исследований открытых стволов наклонных скважин и скважин с горизонтальным завершением, в том числе боковых стволов, диаметром 124–144 мм, бурящихся на нефть и газ [18]. Комплекс позволяет за одну спускоподъёмную операцию произвести измерение и регистрацию следующих геофизических параметров: кажущегося удельного электрического сопротивления девятью индукционными зондами разной глубинности, потенциала естественной поляризации скважины (ПС), азимут скважины, зенитный угол скважины, угол отклонителя (угол вращения прибора), естественной гамма-активности пород (ГК), удельного электрического сопротивления (УЭС) бурового раствора, температуры бурового раствора.

Автономная скважинная система комплекса «АЛМАЗ-2И» предназначена для доставки на забой буровым инструментом. Этот способ доставки обеспечивает возможность проведения каротажа протяжённых горизонтальных участков обследуемых скважин.

Комплекс состоит из следующих систем: скважинной автономной системы, средства доставки в скважину, наземной системы определения глубины, системы программных модулей RealDepth v4.x.x.

Автономная скважинная система предназначена для измерения и записи геофизических и технологических параметров различного назначения. Автономная скважинная система состоит из трёх модулей: модуль памяти и питания (МПП), измерительный модуль ВЭМКЗ, измерительный модуль интегрального ГК и резистивиметра (МГКР).

Средство доставки состоит из рассекателя и муфты переходной с конической замковой резьбой З-86.

Наземная система определения глубины автономного измерительного комплекса предназначена для измерения перемещений талевого блока (крюка) во время проведения каротажа с учётом нагрузки и разгрузки крюка и вычисления перемещения буровой колонны.

Наземная система определения глубины включает: преобразователь линейных перемещений (ПЛП) талевого блока, преобразователь натяжения троса (ПНТ), блок интерфейса (БИ), компьютер, источник бесперебойного питания (Back-UPS), комплект соединительных кабелей.

Система программных модулей RealDepth v4.x.x предназначена для сбора информации об измерениях со скважинной и наземной измерительных систем, и взаимной увязки данных на основе записи точного времени событий.

Система также осуществляет автоматическую пакетную интерпретацию данных измерений, все необходимые операции по документированию и преобразованию данных в распространённые форматы представления геофизических данных (*.las, *.rtx).

Использование программы МФС ВИКИЗ для дальнейшей интерпретации данных каротажа скважин позволяет представить их в виде удельного электрического сопротивления пород с нормированными погрешностями измерения.

2. Основные технические характеристики

Перечень параметров с нормированной погрешностью (геофизических и технологических), измеряемых комплексом, приведён в табл. 2.1. В таблице также приведены число каналов измерения комплекса, единицы измерения, диапазон, основная погрешность и дополнительная температурная погрешность.

Таблица 2.1

Перечень метрологических характеристик комплекса «АЛМАЗ-2И»

Измеряемый параметр	Число каналов	Единица измерения	Диапазон	Дискрет-ность	Основная погрешность
УЭС породы		Ом·м	1÷200	–	(5+20·к/в) %
ПС		мВ	+/-1250	1	+/-0,6мВ
Уровень интегральной гамма активности породы		мкР/час	0÷250	0,1	15 %
УЭС бурового раствора		Ом·м	0,02÷10	0,00015	(3+20·к/в) %
Температура бурового раствора		град	5÷85	0,01	+/-0,5
Магнитный азимут		угл. град.	0÷360°	0,1°	±1,5°÷3°
Зенитный угол		угл. град.	0÷180°	0,05°	±0,25°
Угол отклонителя		угл. град.	0÷360°	0,1°	±3°

Примечание: к – измеряемое значение; в – верхний предел измерения.

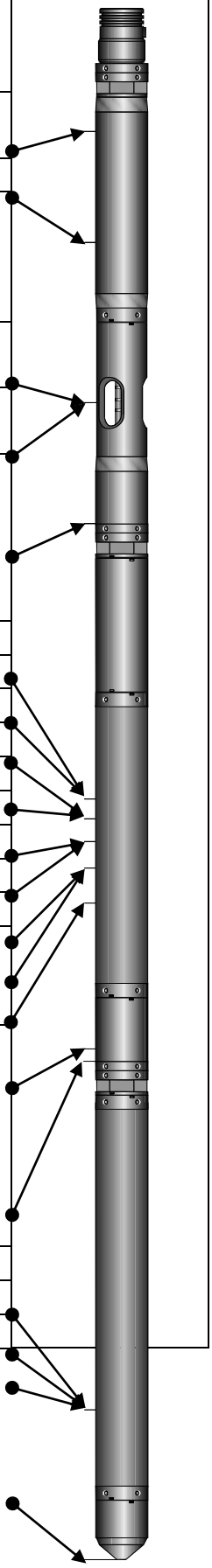
В зондовой скважинной системе точки записи смещены относительно нижнего окончания модуля ВЭМКЗ. Значения смещений приведены в табл. 2.2.

Перечень доступных для контроля технологических измеряемых величин приведён в табл. 2.3.

Таблица 2.2

Расположение точек записи ВЭМКЗ

Наименование параметра	Обозначение	Частота	Длина зонда	Смещение точки записи
Гамма 2	MGKR_GK2			**8,268**
Гамма 1	MGKR_GK1			**7,808**
Температура бурового раствора	MGKR_T			**7,305**
УЭС бурового раствора	MGKR_R			**7,303**
Модуль ВЭМКЗ 7**,067**				
Разность фаз зонда **0,5**	DF5	14,00 МГц	0,500	**5,1**
Разность фаз зонда **0,6**	DF6	7,0 МГц	0,566	**5,1**
Разность фаз зонда **0,7**	DF7	7,00 МГц	0,707	**4,959**
Разность фаз зонда **0,8**	DF8	3,50 МГц	0,800	**4,959**
Разность фаз зонда **1,0**	DF10	3,50 МГц	1,000	**4,759**
Разность фаз зонда **1,1**	DF11	1,75 МГц	1,131	**4,759**
Разность фаз зонда **1,4**	DF14	1,75 МГц	1,414	**4,471**
Разность фаз зонда **1,6**	DF16	0,875 МГц	1,600	**4,471**
Разность фаз зонда **2,0**	DF20	0,875 МГц	2,000	**4,071**
Потенциал скважины	PS			**3,52**
Инклинометр **3,42**				
Зенит	Zenith_Angle			**0,5**
Вращение	Standoff_Angle			**0,5**
Азимут	Azimuth_Angle			**0,5**



Точка отсчёта смещений	

Таблица 2.3

Технологические измеряемые величины

Наименование параметра	Число каналов	Единица измерения	Диапазон	Дискретность
Вес на крюке	1	у.е.	0…4095	1 у.е.
Ход талевого блока	1	м	0…25	±5 мм
Скорость каротажа	1	м/ч	0…700	
Глубина	1	м	5000	±5 мм
Текущее время	1	час, мин, сек	00:00:01 23:59:59	0,01 сек
Температура в МПП	1	град.	-10÷85	±0,5 град.
Напряжение батареи МПП	1 (или 8)	Вольт	14…17,5	±0,2 В
Ускорение при ударах МПП	3 по *x*, *y*, *z*	g	0…50	0,5 g

Рабочие условия наземной аппаратуры:

диапазон температур окружающего воздуха, °С +10...+45;

относительная влажность окружающего воздуха при 30 °С, % 5-90;

конденсация влаги на элементах не допустима.

Рабочие условия скважинной аппаратуры

При каротаже автономная скважинная система может выдерживать следующие рабочие условия:

максимальное гидростатическое давление, МПа не более 60;

диапазон рабочих температур, °С от +10 до +85;

виброударные нагрузки по ГОСТ 26116-84, группа МС2-3 не более 15g;

радиус кривизны скважины, м не менее 60;

осевая нагрузка сжатие, т не более 10;

осевая нагрузка на разрыв, т не более 30;

скорость спуско-подъёма, м/ч не более 2000;

скорость спуско-подъёма в интервале зарезки, м/ч не более 200;

скорость каротажа, м/ч не более 800.

3. Устройство и работа комплекса

Комплекс регистрирует и интерпретирует геофизическую и технологическую информацию от наземных и скважинных модулей, благодаря взаимодействию нескольких систем:

– автономной скважинной системы;

– системы определения глубины;

– системы сбора информации и интерпретации RealDepth.

Автономная скважинная система производит сбор геофизической и технологической информации в скважине и записывает эту информацию в энергонезависимую память. В зондовой части располагаются часы реального времени (ЧРВ) модуля памяти и питания, текущие показания которых записываются в память. Автономная скважинная аппаратура производит запись геофизической и технологической информации (рис. 2.1).

Синхронизация часов МПП производится во время подготовки зондовой системы к спуску в скважину с часами компьютера. Вторые ЧРВ располагаются в интерфейсном блоке. Синхронизация двух часов происходит в момент переведения зондирующей системы в автономный режим. Данная операция производится непосредственно на скважине после сборки зондирующей системы и подключения её к компьютеру через интерфейсный блок. Значение текущего времени компьютера одновременно заносится в часы реального времени БИ и часы реального времени МПП, после чего автономная скважинная система готова к самостоятельной работе.

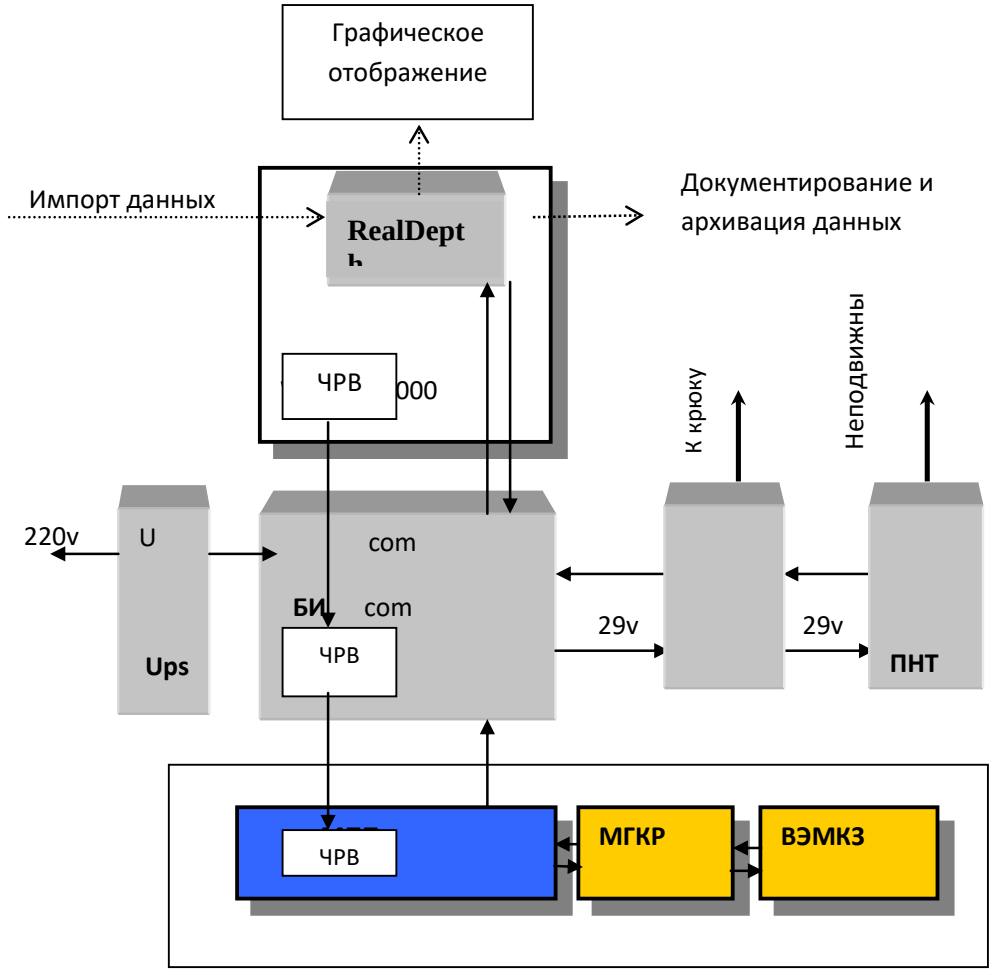


Рис. 2.1. Взаимодействие систем комплекса «АЛМАЗ-2И»

Значение времени в обоих ЧРВ после операции синхронизации будет одинаковым, допустимый уход не более чем 1 сек за 12 часов при условии, если обе части не обесточивались.

Если данное условие не выполняется и происходит отключение часов реального времени, расположенных в блоке интерфейса на длительное время, произойдёт утеря исходных установок времени, что затруднит восстановление информации о глубине. Чтобы восстановить установки времени в часах интерфейсного блока необходимо снова провести операцию синхронизации часов от компьютера. При этом возможна ошибка синхронизации между скважинной и наземной частями системы на несколько секунд из-за ухода часов компьютера. Не следует забывать, что компьютер может самостоятельно переводить поясное время на час вперёд или назад, учитывая зимнее и летнее время, вследствие чего возможно скачкообразное смещение данных глубины на час. Для увеличения надёжности системы синхронизации применяются источники бесперебойного питания для блока интерфейса (в

экстремальных ситуациях для увеличения времени работы часов в отсутствии сетевого питания рекомендуется отключать ПЛП от интерфейсного блока и подключать при возобновлении сетевого питания). Наземная система определения глубины работает непосредственно с компьютером через интерфейсный блок под управлением оболочки RealDepth и использует часы БИ, преобразователи перемещения талевого блока (ПЛП) и натяжения троса (ПНТ). Информация с преобразователя натяжения троса под управлением оболочки RealDepth записывается в файл глубины и в дальнейшем используется для вырезания моментов разгрузки талевого блока, так как в эти моменты движения зондовой системы не производится. Измеренные перемещения талевого блока во время каротажа аналогично записываются и используются в дальнейшем для вычисления глубины зондирующей системы (с учётом смещения её точек записи). Для привязки глубин регистрируемой информации, необходимо указать глубину, на которую произведён спуск зондирующей системы, а затем относительно этой величины будут определены все остальные отсчёты глубины с учётом направления перемещения зондовой системы.

После проведения каротажа производится чтение геофизической и технологической информации из памяти МПП зондовой системы и сохраняется в файл *.mpp.

RealDepth осуществляет увязку глубин, используя данные системы определения глубины и системы синхронизации времени. Вся зарегистрированная информация приводится к стандартному шагу по глубине – 0,1 м, отсутствующие отсчёты восстанавливаются путём интерполяции по соседним точкам, а лишние отсчёты усредняются. Далее данные преобразовываются в удобный для отображения вид в единицах физических величин.

RealDepth также используется для документирования результатов каротажа различными способами и форматами (*.las, *.rtx); анализа данных каротажей, произведённых ранее, или другими аналогичными комплексами; контроля функционирования скважинных модулей и преобразователей в интерактивном режиме; калибровки измерительных модулей и преобразователей.

Для проведения каротажа требуется: заблаговременно запрограммировать зондовую систему на расчётное время достижения забоя и самостоятельное включение; спустить зондовую систему на буровых трубах в точку начала каротажа к расчётному времени; включить систему определения глубины на запись файла глубины; после достижения времени включения осуществить подъём (спуск) зондовой системы с допустимой скоростью каротажа; поднять зондовую систему на поверхность и извлечь из скважины; отсоединить МПП и произвести чтение информации из памяти; произвести увязку глубин.

Задание

1. Изучить технические характеристики автономного комплекса «Алмаз-2И».

2. Изучить устройство скважинного прибора АК «Алмаз-2И».

3. Проанализировать комплекс каротажных диаграмм, полученных с помощью АК «Алмаз-2И», и описать возможности литологического расчленения разреза этим комплексом.

4. Составить пояснительную записку.

Контрольные вопросы

1. Для чего предназначен автономный комплекс «АЛМАЗ-2И»?

2. Какие параметры измеряются с помощью комплекса «АЛМАЗ-2И»?

3. Назовите максимальный диаметр скважинного комплекса «АЛМАЗ-2И».

4. При каком максимальном гидростатическом давлении возможна работа с данным комплексом?

5. Расшифруйте аббревиатуру модуля – МПП.

6. Какие параметры измеряются с помощью модуля МГКР?

7. Каков диапазон регистрации естественной интегральной гамма-активности пород в модуле МГКР?

8. Для чего предназначен программный комплекс RealDepth?

9. В каком формате документируются результаты каротажа?

10. Назовите массу системы привязки по глубине.

Работа 3. АППАРАТУРНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ АВТОНОМНЫЙ КОМПЛЕКС «ОБЬ»

1. Состав и краткое описание

АМАК «Обь» предназначен для проведения комплекса ГИС на буровом инструменте в открытом стволе скважин, бурящихся диаметром 190, 215,9 и 243 мм, и имеющих горизонтальное или пологое (более 450 м) окончание [6].

Отдельные модули АМАК «Обь» (модуль РК, акустический модуль) могут быть спущены и в обсаженную часть ГС и ПС на буровом инструменте малого диаметра или НКТ для проведения радиоактивного каротажа и акустической цементометрии в обсадной колонне (и хвостовиках) диаметром 4, 5 и 6 дюйма.

2. Основные технические характеристики

Диаметр защитных кожухов модулей АМАК «Обь» – 73 мм, длина нерасчлененной части одного модуля не превышает 4 м.

Условия эксплуатации АМАК «Обь»:

температура в скважине	не выше 90 °С;
давление в скважине	не выше 600 МПа;
скорость подъема при каротаже	не более 800 м/ч (на первой скорости лебедки);
скорость спуска и подъема без записи	не более 3000 м/ч;
продолжительность записи	не более 10 ч;

количество модулей в сборке не ограничивается, однако на первом этапе внедрения общая длина сборки рекомендуется до 25 м;

расход промывочной жидкости при выталкивании сборки из инструмента и промывке скважины	28–42 л/сек;
наружная температура воздуха, при которой возможна работа с АМАК «Обь» (сборка, разборка, считывание информации и т. п.)	от –50 °С до +50 °С.

3. Устройство и работа комплекса

Аппаратурно-методический автономный комплекс содержит автономные модули различных методов исследований, соединенные между собой в сборку, к верхней части которой присоединяется устройство для удержания сборки внутри бурильной колонны на замковом соединении в процессе спуска бурильной колонны на забой горизонтальной скважины и выталкивания сборки из бурильной колонны в открытый ствол циркуляцией бурового раствора. Удерживающее и выталкивающее устройство соединены со штоком обратного хода, длина которого превышает величину обратного хода бурового инструмента при посадке его на клинья для отворота очередной свечи.

Выталкивание сборки из бурильной колонны и приведение модулей в рабочее положение происходит только при сбросе в буровую колонну специального запорного приспособления и продавливания его циркуляцией бурового раствора до посадки на гнездо выталкивающего устройства. Нижняя часть бурильной колонны заканчивается специальным обтекателем, имеющим посадочное седло, на которое садится нижняя часть выталкивающего устройства и циркуляционные отверстия, обеспечивающие циркуляцию бурового раствора. Автономные модули соединены со штоком обратного хода и между собой шарнирными соединениями с регулируемым углом перекоса. Включение каждого автономного модуля происходит при его выходе из обтекателя за счет изменения сигнала на феррозондовом датчике, помещенном в диамагнитном корпусе автономного модуля, а выключение при подъеме бурильной колонны – при обратном изменении сигнала на феррозондовом датчике при вхождении автономного модуля в башмак ранее спущенной обсадной колонны. Все автономные модули дополнительно содержат автономные блоки питания, блоки преобразования сигналов и памяти.

На рис. 3.1 представлена схема компоновки модулей в бурильной трубе во время спуска в скважину.

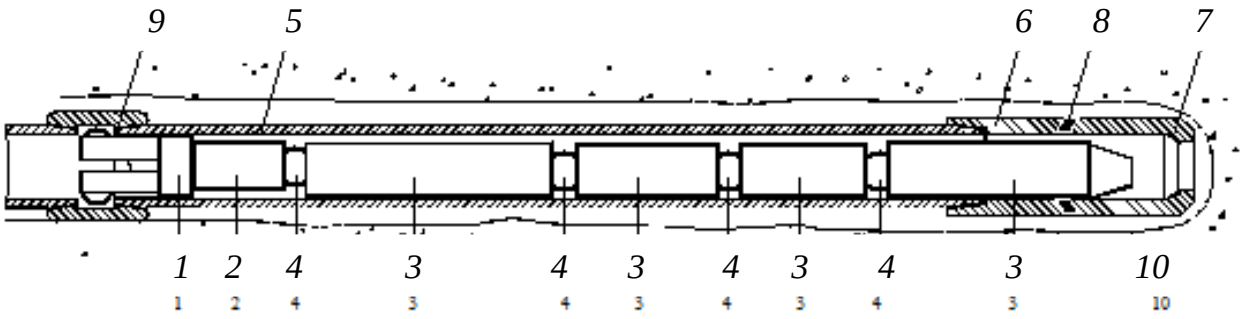


Рис. 3.1. Аппаратурно-методический комплекс

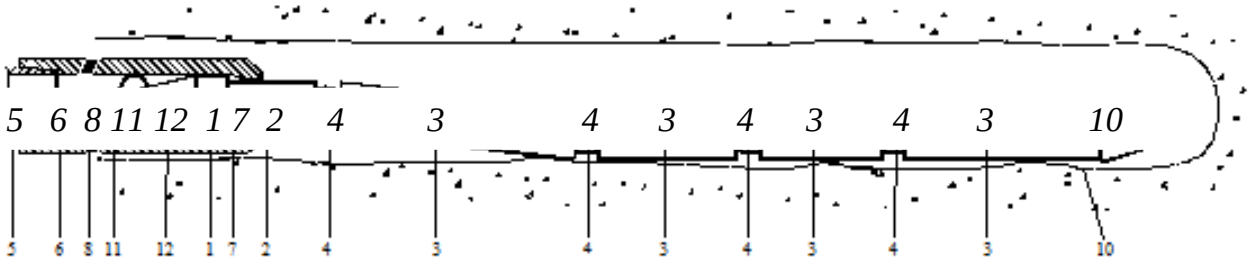
для каротажа горизонтальных скважин на бурильных трубах

Верхняя часть сборки содержит удерживающее и выталкивающее устройство *1*, шток обратного хода *2*, набор функциональных модулей *3*, соединенных между собой шарнирными соединениями *4*.

Бурильная труба *5*, в которой размещена сборка автономных модулей, заканчивается обтекателем *6* с посадочным седлом *7* и промывочными (циркуляционными) отверстиями *8*. Удерживающее и выталкивающее устройство *1* садится на замковое соединение *9* и опускается в скважину *10*.

На рис. 3.2 представлена схема расположения сборки модулей в открытом стволе горизонтальной скважины *10* после ее выталкивания из бурового инструмента *5* (рабочее положение) за счет повышения перепада давления при посадке специального запорного приспособления *11* на посадочное гнездо *12* выталкивающего устройства *1*.

Рис. 3.2. Аппаратурно-методический комплекс
для каротажа в открытом стволе горизонтальных скважин



Аппаратурно-методический автономный комплекс работает следующим образом.

На мостках буровой производится сборка автономных скважинных приборов, реализующая необходимый комплекс ГИС. К верхней части сборки подсоединяется удерживающее и выталкивающее устройства *1* и шток обратного хода *2*. В скважину опускается свеча (25 м) бурового инструмента, на конце которой имеется обтекатель *6*. После этого сборка поднимается вспомогательной лебедкой над устьем скважины и медленно опускается в бурильные трубы *5* до посадки на замковое соединение *9*. Далее производится наращивание очередной свечи бурового инструмента и осуществляется обычный спуск бурового инструмента на забой горизонтальной скважины. В случае необходимости может осуществляться промывка скважины, а также вращение бурового инструмента ротором, при этом сборка скважинных приборов остается на месте, надежно зафиксированная удерживающим устройством. Процесс спуска аппаратурно-методического комплекса на

забой горизонтальной скважины, его выталкивание из бурового инструмента и каротаж сопровождаются записью в компьютер (с отображением на экране монитора) информации от наземных датчиков: глубины, веса инструмента, давления, положения клиньев ротора. При достижении забоя горизонтальной скважины, что фиксируется по глубиномеру и разгрузке инструмента через датчик веса, инструмент поднимается из скважины на длину сборки и устанавливается на клинья ротора, после чего внутрь бурового инструмента сбрасывается специальное запорное приспособление *11*, на верхнюю часть инструмента наворачивается квадрат и дается циркуляция. При посадке специального запорного приспособления *11* на гнездо *12* происходит частичное перекрытие проходного сечения в удерживающем и выталкивающем устройстве *1*, что приводит к повышению перепада давления на нем и к срыву удерживающего устройства *1* с замкового соединения *9* бурильной трубы *5*. Сборка под перепадом давления начинает двигаться вдоль бурильной трубы *5* и выходит из обтекателя *6*. После прохождения выталкивающего устройства *1* мимо циркуляционных отверстий 8 и посадки его на седло *7* происходит падение давления, что является сигналом о выходе сборки из бурильной трубы *5* в открытый ствол скважины *10* и готовности ее модулей *3* к работе. Включение питания модулей *3* происходит поочередно при выходе из обтекателя *6* по сигналу феррозондовых датчиков, устанавливаемых в диамагнитных корпусах модулей *3*. Питание самих феррозондовых датчиков подключается заранее при программировании работы модулей *3* через специальный персональный компьютер (дежурный режим с минимальным потреблением энергии).

Далее начинается подъем бурового инструмента и каротаж спущенным комплексом. В горизонтальной части ствола скважины *10* и в интервале выхода на горизонталь до углов 40–450 сборка будет лежать на нижней стенке ствола скважины, так как модули соединены между собой шарнирными соединениями с регулируемым углом перекоса, позволяющим автономным модулям *3* свободно вращаться относительно друг друга.

При подъеме и отвинчивании очередной свечи буровой инструмент сажают на клинья ротора. При этом происходит движение инструмента вниз в диапазоне 0,5–1,0 м. В заявляемом комплексе движение инструмента вниз при посадке на клинья ротора не приводит к обратному движению сборки модулей, так как при этом происходит перемещение обтекателя *6* относительно штока обратного хода *2*, а сборка остается на месте. Этим достигается исключение повторной записи измеряемых параметров, которые являются излишними и требуют корректного устранения при обработке полученного материала. Таким образом, при наличии штока обратного хода запись геофизической информации будет осуществляться только при движении сборки снизу вверх. Отключение питания модулей *3* (перевод их в дежурный режим) осуществляется при вхождении

модулей *3* в башмак ранее спущенной колонны (технической или кондуктора) по сигналу феррозондовых датчиков, экранируемых стальной колонной. В качестве дополнительного варианта предусматривается включение и выключение модулей по заранее установленному времени.

После выхода из интервала исследований скорость подъема инструмента может быть увеличена до 1500–2000 м/ч. После извлечения сборки из скважины ее опускают на мостки для разборки. Зарегистрированная информация из автономных приборов через считывающее устройство переписывается в компьютер, в который ранее записывалась информация в функции времени: давление на насосах, вес на крюке, положение клиньев, глубина нахождения обтекателя, положение талевого блока. Совмещение информации от наземных датчиков, зарегистрированной на компьютере во время подъема инструмента с забойной информацией от сборки, переписанной в компьютер после ее подъема на дневную поверхность, осуществляется путем совмещения шкалы времени в хронометрах компьютера и автономных приборов. Таким образом, вся геофизическая информация оказывается зарегистрированной в функции глубин, как и при обычном каротаже. После перенесения зарегистрированной информации из сборки в компьютер осуществляется просмотр и редактирование полученной информации, а затем отредактированная информация в виде каротажных диаграмм выводится через принтер/плоттер для передачи Заказчику непосредственно на скважине. В случае необходимости на скважине может быть выдано и предварительное заключение. Информация по радиомодемной связи может быть также передана на базу для глубокой интерпретации.

Так как все наземное оборудование, необходимое для реализации технологии проведение ГИС в горизонтальных скважинах с помощью аппаратурно-методического автономного комплекса, входит в комплект компьютеризированных станций геолого-технологических исследований, устанавливаемых на всех бурящихся горизонтальных скважинах, на скважину требуется транспортировать только забойную часть комплекса в разобранном виде (скважинные приборы + оснастка).

В настоящее время максимальная длина сборки АМАК «Обь» может содержать следующие модули:

- модуль ВИКИЗ;
- модуль инклинометра 1;
- модуль инклинометра 2;
- модуль 4-зондовой аппаратуры индукционного каротажа;
- модуль РК (ГК + 2ННК).

Сборка (разборка) модулей может осуществляться как на мостках буровой, так и поэлементным спуском (подъемом) отдельных модулей на устье скважины с использованием подкладной вилки и специального приспособления для подъема (спуска) модулей.

4. Прочие особенности комплекса

Прикладное программное обеспечение (ПО) предназначено для поддержки полного технологического цикла проведения геофизических исследований скважин (ГИС) автономным прибором АМАК «Обь» и обеспечивает: тестирование отдельных модулей АМАК «Обь»; проведение базовых калибровок приборов с записью калибровочных данных на жесткий диск; настройку модулей перед регистрацией данных ГИС; считывание и контроль записанной информации; формирование базового файла ВРЕМЯ и ГЛУБИНА в формате LAS по данным станции ГТИ; первичное редактирование данных каротажа с привязкой к глубине по данным станции ГТИ и совмещением точек записи по глубине; выдачу первичных материалов каротажа на твердую копию; просмотр и редактирование материалов каротажа; первичную обработку каротажных данных с вводом поправок за геолого-технические условия проведения измерений; выдачу результатов обработки на твердую копию.

Прикладное ПО обеспечивает выполнение этих функций в полном объеме при проведении каротажных работ с аппаратурой радиоактивного каротажа (СРК-73Г), электромагнитного (ВИКИЗ), индукционного (ИК-4Г) и инклинометром.

Задание

1. Изучить технические характеристики автономного комплекса АМАК «Обь».
2. Изучить устройство скважинного прибора АМАК «Обь».
3. Проанализировать комплекс каротажных диаграмм, полученных с помощью АМАК «Обь», и описать возможности литологического расчленения разреза этим комплексом.
4. Составить пояснительную записку.

Контрольные вопросы

1. Какие датчики работают в дежурном режиме?
2. Какая компания осваивала технологию АМАК «Обь»?

3. Какую предшествующую технологию должен заменить комплекс АМАК «Обь»?

4. Каким образом осуществляется привязка данных по глубине в технологии АМАК «Обь»?

5. Какой комплекс методов применяется в технологии АМАК «Обь» на сегодняшний день?

6. Назовите способ осуществления записи геофизической информации (при спуске, подъеме, не имеет значения).

7. На каком этапе исследования ГС применяется аппаратура АМАК «Обь»?

8. Какое наземное оборудование необходимо иметь в комплексе АМАК «Обь»?

9. Из каких основных блоков состоит аппаратура АМАК «Обь»?

10. Каким образом осуществляется доставка скважинных приборов, входящих в состав комплекса АМАК «Обь», на забой скважины?

Работа 4. СТАНЦИЯ БЕЗКАБЕЛЬНОГО КАРОТАЖА СБК «АМАК»

1. Состав и краткое описание

Станция бескабельного каротажа (СБК «АМАК») предназначена для проведения геофизических, геолого-технологических и геохимических исследований наклонных и горизонтальных скважин, бурящихся из старого фонда, и включает в себя следующие подсистемы: лаборатория, размещенная на базе полноприводного трехосного шасси КамАЗ; аппаратура скважинная автономная геофизическая; контейнеры бурового инструмента для размещения скважинной аппаратуры; газоаналитическая аппаратура; комплект датчиков технологических; система сбора информации; компьютерное оборудование; комплект инструментов и приборов технического обслуживания и калибровки аппаратуры [14].

Аппаратурный методический автономный комплекс «АМАК-45» предназначен для геофизических исследований скважин следующими методами: радиоактивного каротажа (ГК, ННК), инклинометрии и ПС, индукционного каротажа (3 ИК-45, имеется возможность работы с ВЭМКЗ-9А), двойного микробокового сканирующего каротажа.

Геолого-технологическая подсистема предназначена для проведения детально-механического каротажа, измерения глубины забоя для привязки геофизической и геохимической информации, раннего обнаружения газонефтеводопроявлений и поглощений при бурении, оптимизации процесса углубления скважины с контролем отработки долот, диагностики предаварийных ситуаций в реальном масштабе времени.

2. Геохимическая подсистема, предназначенная для проведения газового каротажа

Основные технические характеристики СБК «АМАК»

Аппаратурный методический автономный комплекс «АМАК-45» предназначен для проведения ГИС на буровом инструменте в открытом стволе крутонаклонных и горизонтальных скважин, диаметром 127-160 мм, с записью информации в память без применения бронированного геофизического кабеля.

Модульное построение комплекса позволяет в любой момент дополнять комплекс новыми приборами по мере окончания их разработки.

Доставка комплекса в горизонтальный ствол осуществляется путем навинчивания приборных контейнеров на конец колонны бурильных труб.

Область применения комплекса: эксплуатационные нефтяные и газовые скважины с горизонтальными и крутонаклонными положениями, радиусом искривления более 40 м.

Рабочие условия применения для скважинных модулей комплекса:

температура рабочей среды	от 0 до +125 °С;
гидростатическое давление	до 60 МПа;
диаметр защитных кожухов модулей АМАК-45	45 мм;
допустимая растягивающая и сжимающая нагрузка на стеклопластиковый контейнер	до 30000 кг;
допустимый крутящий момент	1000 кг·м;
внутренний диаметр контейнера	60 мм.

Общий вид комплекса представлен на рис. 4.1. Комплекс состоит из модулей: ДМБК, 3 ИК, инклинометра, СРК-45, МПП. Модули устанавливаются в контейнеры,



соответствующие каждому виду аппаратуры: 3 ИК в стеклопластиковый контейнер длиной 4550 мм; СРК-45 в контейнер из сплава В95 длиной 4600 мм; инклинометр вкручивается в контактное устройство стеклопластикового контейнера.

Рис. 4.1. Общий вид комплекса

ДМБК выполнен в силовом несущем корпусе и устанавливается оконечным модулем длиной 4100 мм.

Контейнеры предназначены для доставки в интервал исследований и предохранения от механических повреждений скважинных приборов, установленных в них. Оканчиваются контейнеры замковыми соединениями с резьбой З-88 из сплава Д16Т.

Основные модули прибора

Модуль питания и памяти (МПП) предназначен для совместной работы со скважинной аппаратурой, имеющей напряжение 12 В и ТТ1, совместимые интерфейсные сигналы. МПП обеспечивает питание, прием регистрируемых данных и хранение их в энергонезависимой памяти. Питание приборов осуществляется от встроенных аккумуляторных батарей номинальным напряжением 12 В и емкостью 4500 мА·час. Объем памяти 2 МБ или 4 МБ с использованием процедуры упаковки и привязки по времени.

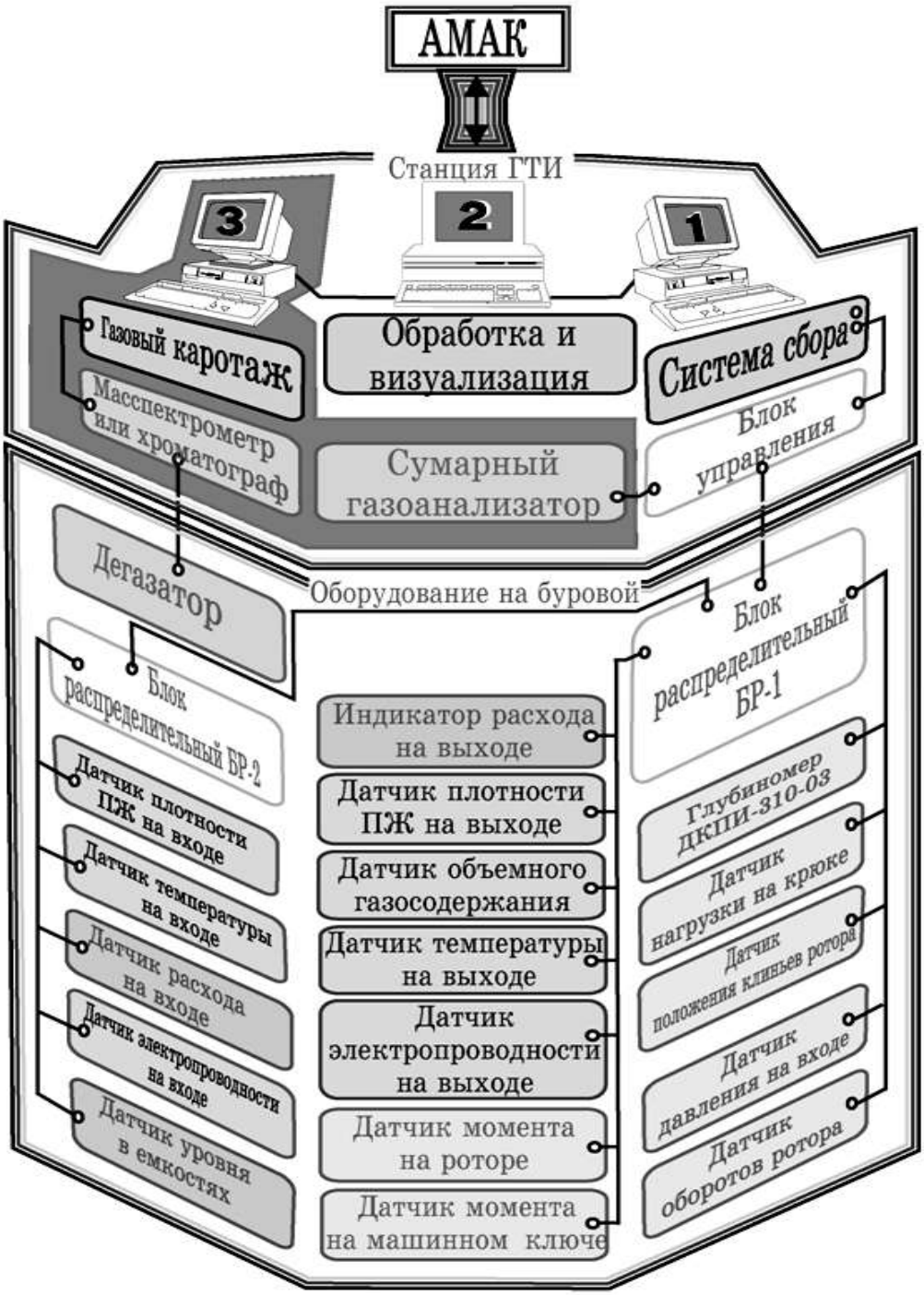


Рис. 4.2. Схема обмена данных СБК «АМАК»

Модуль радиоактивного каротажа предназначен для измерения мощности экспозиционной дозы (МЭД) естественного гамма-излу-чения (гамма-каротаж – ГК) и водонасыщенной пористости пород (компенсированный нейтрон-нейтронный каротаж по тепловым нейтронам – 2 ННКт), применяется для исследования открытых и обсаженных нефтяных и газовых скважин, заполненных любой промывочной жидкостью с доставкой к

забою через инструмент. Детекторы нейтронов расположены на двух различных расстояниях от источника – ближнем и дальнем. Параметры и конструкция зондов выбраны так, чтобы максимально ослабить влияние скважинных условий на вычисляемую водонасыщенную пористость горных пород.

Общая схема обмена данных комплекса представлена на рис. 4.2.

3. Прочие компоненты комплекса

Глубиномер. Датчик ДКПИ-310-03 предназначен для измерения параметров перемещения талевого блока и рабочего инструмента вдоль ствола скважины (табл. 4.1).

Датчик усилия натяжения каната. Датчик предназначен для измерения усилия натяжения неподвижной ветви талевого каната, что позволяет рассчитать вес бурового инструмента и контроля нагрузки на долото в процессе бурения, а также для измерения веса на крюке буровой установки в процессе различных технологических операций при строительстве скважин.

Таблица 4.1

Основные параметры датчиков

Датчик	Контролируемые параметры	Пределы измерения
Датчик контроля перемещения инструмента (глубиномер)	Положение талевого блока, м	0-50
	Глубина забоя, м	0-10000
	Положение долота над забоем, м	0-10000
	Мгновенная скорость перемещения талевого блока, м/с	0-10
Датчик усилия натяжения каната измерительный	Натяжение неподвижной ветви каната талевой системы, тс	0-40
Датчик давления	Давление на входе в скважину, МПа	25, 40, 60, 100
Датчик давления в привода клиньев ротора	Давление в пневмосистеме, МПа	0-0,6
Датчик оборотов ротора	Число оборотов ротора в минуту	30-650
	Суммарное число оборотов ротора	
Датчик крутящего момента на роторе	Сила переменного тока электропривода ротора, А	0-500

	Механический момент на роторе (реактивный момент стола ротора относительно станины), кН-м	0-30
	Механический момент на роторе (для карданного привода), кН·м	0-30
Ультразвуковой датчик уровня	Диапазоны измерения уровня	0-3
Расходомер ультразвуковой доплеровский	Скорость потока жидкости, м/с	0,5-10
Датчик температуры	Температура раствора на выходе из скважины, °С	0-85
	Температура раствора на входе в скважину, °С	0-85
Датчик плотности бурового раствора	Плотность промывочной жидкости в емкости, т/м^3	0,8-2,5
Датчик электро-проводности бурового раствора	Электропроводность промывочной жидкости в емкости, См/м	0,05-100

Датчик давления. Датчик может использоваться в условиях, где необходимо непрерывное измерение давления жидкости от 25 до 100 МПа. Датчик применяется для измерения давления бурового раствора в нагнетательной линии, давления скважины в линии под превентором, давления на цементировочном агрегате, момента на роторе в буровых установках с гидравлическим приводом ротора, момента на машинном ключе для конструкций с гидроприводом.

Датчик приближения магнита. Датчик предназначен для измерения частоты и общего количества циклических перемещений различных механизмов, например, частоты вращения вала и т. п. На буровых установках датчик применяется для измерения частоты вращения бурильной колонны при роторном бурении и измерения частоты ходов поршня буровых насосов. Датчик срабатывает при приближении к нему постоянного магнита, измеряет частоту срабатываний и считает общее их количество. Передаёт результаты измерений по однопроводной цифровой линии связи. Кроме цифрового выхода имеется логический: магнит есть/магнита нет.

Датчик плотности бурового раствора. Датчик предназначен для непрерывного измерения плотности промывочной жидкости (ПЖ) в рабочих емкостях буровой установки, а также плотности в любых технологических емкостях.

Задание

1. Изучить технические характеристики автономного комплекса СБК «АМАК».

2. Изучить устройство скважинного прибора СБК «АМАК».

3. Проанализировать комплекс каротажных диаграмм, полученных с помощью СБК «АМАК», и описать возможности литологического расчленения разреза этим комплексом.

4. Составить пояснительную записку.

Контрольные вопросы

1. Для каких исследований предназначена система СБК «АМАК»?

2. В каких скважинах применяется комплекс СБК «АМАК»?

3. Какие блоки входят в станцию СБК «АМАК»?

4. Какой комплекс методов содержит станция СБК «АМАК»?

5. Из чего состоит геолого-технологический комплекс?

6. В скважинах какого диаметра возможно проведение ГИС с помощью СБК «АМАК»?

7. Назовите способ доставки системы СБК «АМАК» на забой.

8. Какие рабочие условия для СБК «АМАК»?

9. Каково назначение модуля НК в сборке СБК «АМАК»?

10. При каких скважинных условиях возможна работа модуля инклинометра в сборке СБК «АМАК»?

Работа 5. АВТОНОМНАЯ ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ СИСТЕМА «ГОРИЗОНТАЛЬ»

1. Состав и краткое описание

Автономная геофизическая система «Горизонталь» предназначена для проведения ГИС на буровом инструменте с записью информации в память без применения геофизического кабеля. Комплекс может эксплуатироваться совместно со станцией ГТИ или специальной передвижной лабораторией и состоит из приборов: гамма-каро-тажа (ГК), радиоактивного каротажа (РК-42), электрического и индукционного каротажа (ЭКМ-45А), инклинометрии (ИМА-42) [1]. Время работы в автономном режиме до 8 часов. Допустимые осевые растягивающая и сжимающая нагрузки на стеклопластиковый контейнер до 20000 кг.

Самая главная особенность проведения исследований с применением автономной аппаратуры – отсутствие возможности регистрации данных измерений в режиме реального времени. Поэтому информация записывается на физические носители, не имеющие связи между собой, в автономном режиме. В скважинном приборе информация с геофизических датчиков измеряется и записывается в автономном блоке памяти, в компьютере наземной станции регистрируются данные о перемещении прибора в скважине.

Для реализации технологии исследования горизонтальных скважин в составе АГС «Горизонталь» имеются автономный скважинный прибор, датчик глубины, датчик нагрузки на крюке и наземный обрабатывающий комплекс.

С помощью датчика глубины (датчик оборотов вала буровой лебедки), установленного на станине буровой лебедки, измеряют и регистрируют в компьютере все перемещения бурового инструмента в процессе измерений в скважине.

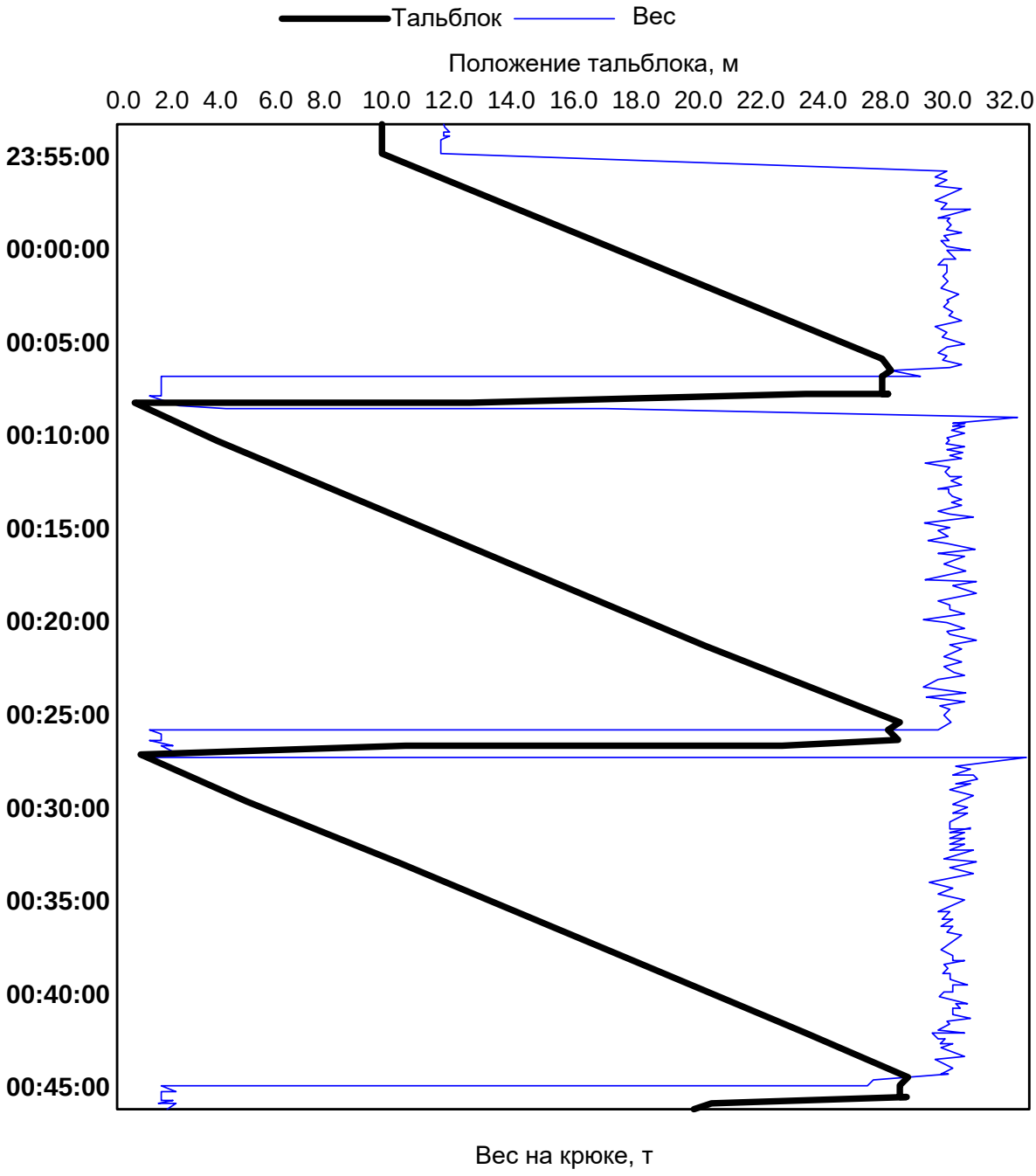


Рис. 5.1. Изображение положения талевого блока и веса на крюке на диаграмме

Датчик нагрузки на крюке талевого каната буровой лебедки предназначен для устранения холостых пробегов талевого блока буровой лебедки при наращивании бурового инструмента, устанавливается на неподвижном конце талевого каната буровой лебедки. Наземный обрабатывающий комплекс содержит персональный компьютер с программным обеспечением, устройство сопряжения (УСО), принтер (термоплоттер). Комплекс предназначен для ввода в компьютер информации со скважинных приборов, с датчика глубины и датчика нагрузки, обработки и вывода информации в виде диаграмм (рис. 5.1).

Типовые условия применения:

– необсаженные горизонтальные и крутонаклонные скважины с радиусом искривления более 40 м, диаметром более 127 мм, заполненные любым флюидом;

– температура рабочей среды до 120 °С, гидростатическое давление – до 60 МПа.

2. Основные технические характеристики

***Модуль ЭКМ-45А*:**

• содержит два фокусированных зонда индукционного каротажа ЗИ 1,0 и ЗИ 0,5 (табл. 5.1):

– индукционный резистивиметр с рабочим диапазоном 0,02-10 Ом·м;

– канал ПС с диапазоном изменения потенциалов самопроизвольной поляризации ± 250 мВ;

– симметричный потенциал-зонд (*AM* 0,5 *NB*);

– симметричный градиент-зонд (*A* 0,45 *M* 0,5 *N* 0,45 *B*);

• диапазон изменения:

– градиент-зонд 5-1000 См/м;

– потенциал-зонд 5-1000 См/м.

Таблица 5.1

Характеристики индукционных зондов

Шифр зонда	Глубина исследования, м	Диапазон измерения УЭС, Ом·м	Рабочая частота генераторов, кГц
ЗИ 1,0	1,4	0,5-200	50
ЗИ 0,5	0,7	0,5-200	100

Примечание. Диапазон измерений УЭС с учетом поправки за скин-эффект.

***Модуль РК-42*:**

• регистрация гамма-каротажа и компенсированного нейтрон-нейтронного каротажа по тепловым нейтронам;

• диапазон измерения:

– гамма-излучение 0-250 мкР/ч;

– водонасыщенная пористость 0-40 %.

***Модуль ГК*:**

• эксплуатируется в связке с инклинометром ИМА-42;

• диапазон измерения:

– гамма-излучение 1-250 мкР/ч.

***Модуль ИМА-42*:**

• эксплуатируется в связке с ГК;

• диапазон измерения:

– азимут 0-360°;

– зенитный угол 0-180° ± 0,2°;

• допускаемая основная погрешность измерения азимута:

– в диапазоне зенитных углов 3-6° и 174-177° ±2°;

– в диапазоне зенитных углов 6-174° ±1°.

Применяется для решения следующих задач:

• литологическое расчленение продуктивного пласта на горизонтальном участке;

• определение характера насыщения коллекторов;

• определение удельного электрического сопротивления пласта, параметров зоны проникновения;

• определение траектории горизонтального участка;

• представление данных ГИС в абсолютных глубинах.

Таблица 5.2

Сборка АГС «Горизонталь»

Название модуля	Длина	Диаметр внутренний	Диаметр наружный	Масса, кг
Контейнер из сплава Д16 для прибора ГК+2ННК-Т	4 924	60	90	55
Стеклопластиковый контейнер для прибора ИК+РЕЗ+ПС	5145	60	90	55
Контейнер из сплава Д16 для прибора ГК + инклинометр	4970	60	90	50
Прибор РК (ГК+2ННК-Т)	2225		45	15
Прибор ИК+РЕЗ+ПС	3150		45	13
Прибор ГК + инклинометр	2580		45	10
Блок батарей и регистрации ББР для РК	1675		45	8
ББР для ИК	1675		45	8
ББР для ГК + инклинометр	1675		45	8

Диаметр защитных кожухов приборов АГС «Горизонталь» – 45 мм; осевые растягивающая и сжимающая нагрузки на стеклоплас-тиковый контейнер – до 20000 кГ; габаритные размеры и массы составных частей комплекса с применением специальных контейнеров приведены в табл. 5.2.

3. Устройство и работа комплекса

Контейнеры предназначены для доставки в интервал исследований и предохранения от механических повреждений скважинных приборов, установленных в них. На концах контейнеры имеют замковые соединения с резьбой МК76.

Скважинные приборы устанавливаются в контейнеры, соответствующие каждому виду аппаратуры:

– РК в контейнер из сплава Д16 на посадочное седло, диаметром 70 мм, расположенное на муфте контейнера;

– ИК в стеклопластиковый контейнер на посадочное седло, диаметром 70 мм, расположенное на муфте контейнера;

– ГК + инклинометр в контейнер из сплава Д16 на посадочное седло, диаметром 70 мм, расположенное на муфте контейнера.

Общие виды приборов представлены на рис. 5.2 – 5.4.

Настоящий регламент разработан на технологию проведения промыслово-геофизических исследований (далее по тексту ГИС) бескабельной линии связи, проводимых в крутонаклонных (свыше 55°) и горизонтальных частях скважин, бурящихся из старых стволов, с доставкой геофизических приборов на бурильных трубах с применением специальных контейнеров.

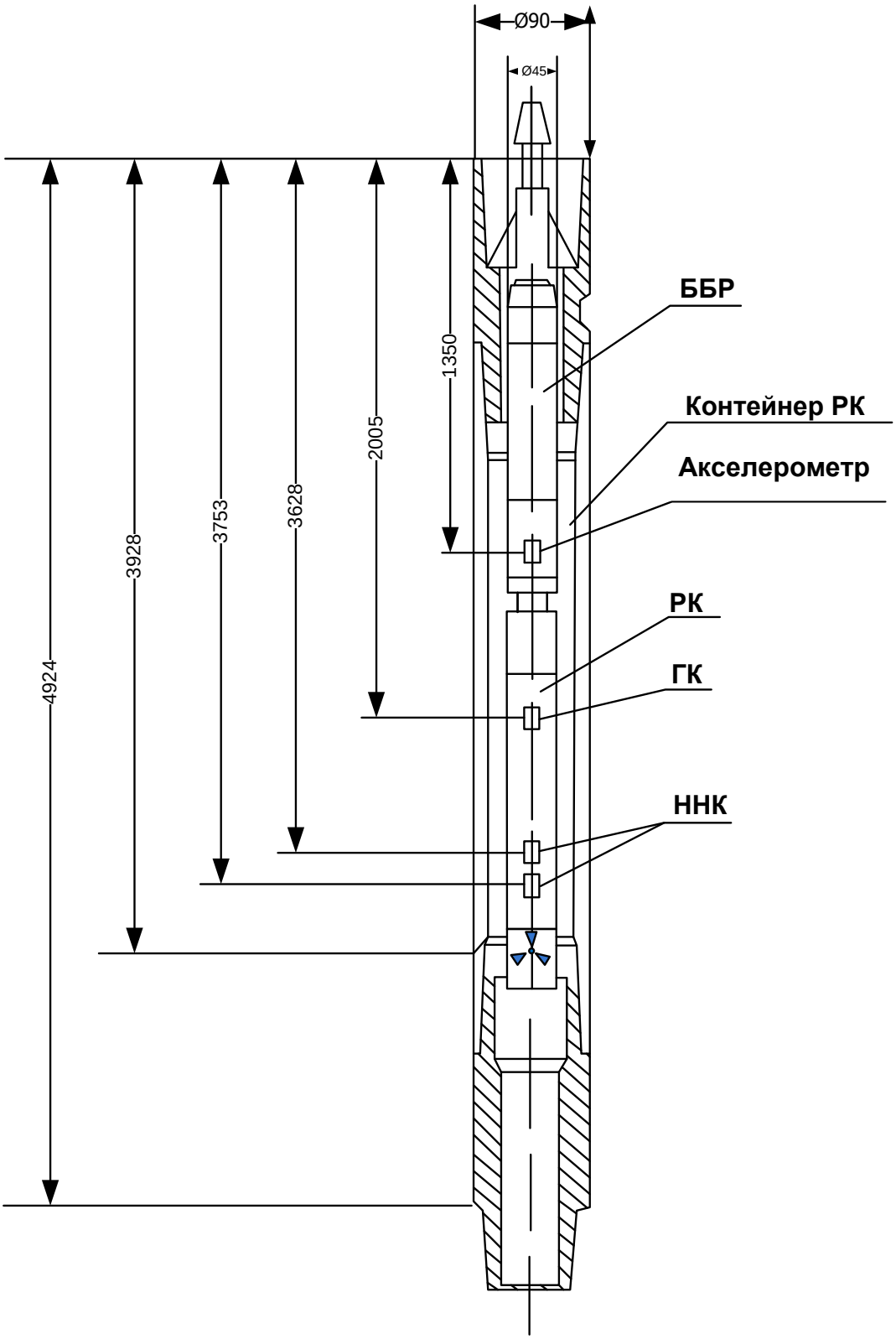


Рис. 5.2. Прибор РК

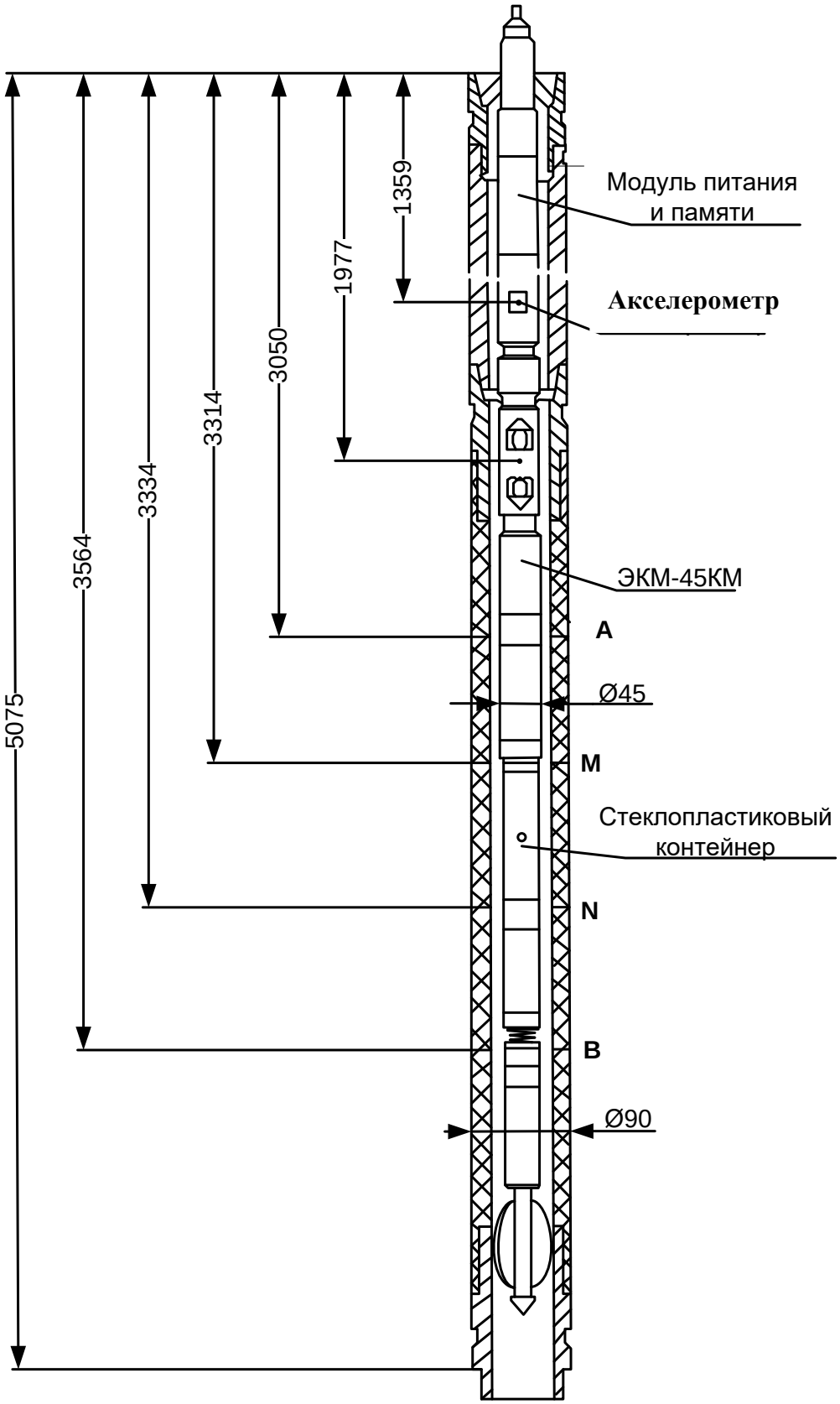


Рис. 5.3. Прибор ЭКМ-45А

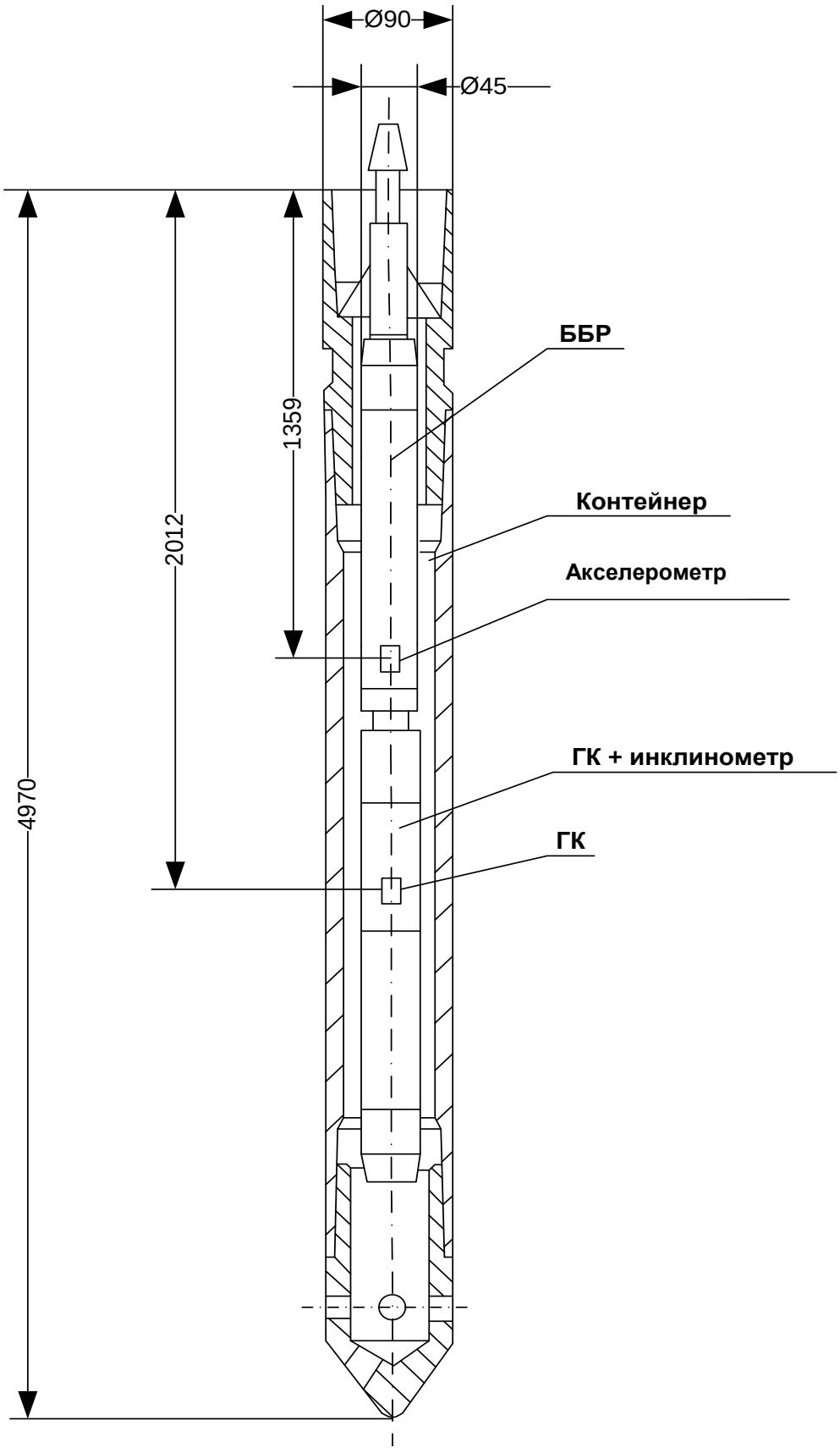


Рис. 5.4. Прибор ГК + инклинометр

Регламент разработан на основании опыта проведения ГИС с применением комплексов АГС «Горизонталь» и АМАК «Обь» в горизонтальных скважинах различной конструкции, пробуренных структурными подразделениями ОАО «Сургутнефтегаз».

Регламент является основным документом на бескабельную технологию в процессе производства ГИС и направлен на организацию и координацию действий исполнителей работ буровых бригад и геофизических партий.

Соблюдение требований, изложенных в настоящем регламенте, обязательно для всех подразделений, выполняющих ГИС с технологическим бескабельным комплексом АГС «Горизонталь».

Настоящий регламент действует на время испытания и внедрения комплекса АГС «Горизонталь». По мере освоения АГС «Горизонталь» и расширения комплекса исследований регламент будет соответствующим образом дополняться и уточняться.

Подготовительные работы буровой бригады

Перед проведением ГИС составляется акт на готовность скважины для проведения геофизических исследований в скважине согласно НРБ.

Перед началом ГИС провести инструктаж, с отметкой в журнале, членам буровой бригады (с каждой вахтой) по технологии проведения СПО при производстве ГИС в горизонтальных скважинах с комплексом АГС «Горизонталь». Ответственный – технолог бригады.

Подготовительные работы геофизической партии:

1. При получении заявки с указанием комплекса и интервала геофизических исследований начальник партии обязан проверить работоспособность скважинных приборов и наземного оборудования. На основании заказанного комплекса работ определяется перечень необходимой геофизической аппаратуры. Ответственный – начальник геофизической партии.

2. Прибыв на скважину, и установив спецтехнику, начальник геофизической партии проверяет готовность скважины к проведению ГИС согласно акту готовности скважины. При этом кроме акта на готовность скважины заполняется технико-технологический паспорт на подготовку и проведение ГИС в горизонтальной скважине.

3. Организовать оперативную связь: начальник партии – бурильщик. Ответственный – начальник геофизической партии.

4. Производится установка датчика веса на крюке согласно руководству по эксплуатации на модуль измерения глубины. Ответственный – буровой мастер, начальник партии.

5. Производится установка и проверка на работоспособность датчика оборотов лебедки (ДОЛ) согласно руководству по эксплуатации на модуль измерения глубины. Ответственный – буровой мастер, начальник партии.

6. Производится монтаж соединительных кабелей и проверка работоспособности модуля измерения глубины согласно руководству по эксплуатации на модуль измерения глубины. Ответственный – буровой мастер, начальник партии.

7. Производится проверка работоспособности модулей, синхронизация системного времени компьютера и часов модуля памяти, программирование ББР на время включения согласно руководствам по эксплуатации на модули. Ответственный – начальник геофизической партии. Сборка комплекса АГС «Горизонталь».

8. Подготовленные к работе контейнеры с приборами переносятся на мостки буровой.

9. На контейнере с прибором ГК+инклинометр в пазы муфты вставляется вилка-подвеска. Затем переводник закрывается планкой и фиксируется болтом. Собранный контейнер с установленной в нем аппаратурой спускается в скважину и удерживается на клиньях. При этом необходимо снять дужку с вилки-подвески.

Так же готовится следующий контейнер с прибором ИК, который скручивается с первым с помощью двух вилок-подвесок. Общая связка приподнимается и снимается нижняя вилка-подвеска. Оба контейнера опускаются в скважину и удерживаются на клиньях. При этом необходимо снять дужку с вилки-подвески. Вилка-подвеска, установленная на накручиваемом контейнере, не снимается! Ответственный – буровой мастер.

Установка контейнера для прибора РК производится аналогично установке второго контейнера, но без прибора РК. РК с радиоактивным источником устанавливается на седло муфты контейнера после его накручивания на предыдущие контейнеры. Для установки РК используется специальная подвеска грузозахватная. Ответственные – буровой мастер и начальник геофизической партии.

4. Проведение геофизических исследований скважин (ГИС)

Бурова бригада, наращивая свечи бурового инструмента, производит спуск инструмента на забой скважины. Спуск инструмента производится со скоростью не более 1500 м/ч. При подходе к окну врезки и забою скважины скорость спуска должна быть

снижена до 500 м/ч. При необходимости осуществляется промер свечей, спускаемых в скважину. Ответственный – буровой мастер.

В случае посадки при спуске инструмента произвести подъем АГС «Горизонталь», ствол скважины проработать компоновкой согласно регламенту данного вида скважин.

При достижении забоя инструмент расхаживают в ожидании времени каротажа. Допустима циркуляция с расходом до 15 л/с (буровой инструмент разгружают не более чем на 15000 кг).

Буровая бригада, в согласованное с начальником геофизической партии время, начинает подъем инструмента от забоя со скоростью не более 400 м/ч в интервале исследования скважины. При этом аппаратура в автономном режиме производит запись информации. После прохождения интервала каротажа производится вновь спуск трех свечей для повторной записи ГИС в интервале исследования со скоростью не более 400 м/ч. Скорость подъема инструмента после выхода из интервала исследований может быть увеличена до 1500 м/ч. После подъема инструмента и отворота последней свечи от транспортного контейнера прибор РК вынимается из контейнера лебедкой и укладывается на мостки буровой.

Разборка осуществляется в обратной последовательности, описанной выше сборки АГС «Горизонталь». С резьбовых соединений контейнеров и с аппаратуры должна быть удалена грязь. Приборы переносятся на станцию, где с них считывается информация.

Задание

1. Изучить технические характеристики АГС « Горизонталь».
2. Изучить принцип действия каждого датчика АГС «Горизонталь».
3. Проанализировать комплекс каротажных кривых, полученных с помощью АГС «Горизонталь», и описать возможности литологического расчленения разреза этим комплексом.
4. Написать пояснительную записку.

Контрольные вопросы

1. Для чего предназначена система «Горизонталь»?
2. Назовите рабочие условия системы без использования аккумуляторов.
3. Каково время работы системы в автономном режиме?

4. Чему равна допустимая растягивающая и сжимающая нагрузки?

5. Из каких измерительных приборов состоит автономная система «Горизонталь»?

6. Какие компоненты входят в состав АГС «Горизонталь»?

7. Назовите максимальную скорость спуска инструмента.

8. Назовите минимальный диаметр скважины.

9. Каково максимальное допустимое гидростатическое давление?

10. Каков максимальный радиус искривления?

Работа 6. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ ИНКЛИНОМЕТРИИ В ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИНАХ

1. Краткое описание

При исследовании горизонтальных скважин в процессе бурения, после бурения и в процессе эксплуатации меняется приоритет методов в комплексе ГИС. Метод инклинометрии становится самым важным, так как при бурении горизонтальных скважин увеличиваются требования к попаданию в горизонтальный круг.

В данной работе необходимо проинтерпретировать результаты инклинометрии по реальной горизонтальной скважине, используя программное обеспечение станции «АМТ МЕГА» [13, 19]:

– менеджер программ «АМТ МЕГА»;

– утилита администратора;

– настройка на объект;

– контроль бурения;

– настройка на цементирование;

– контроль цементирования;

– АРМ;

– редактор кривых;

– справочники;

– работа с архивом;

– выпуск документов.

Необходимо сначала войти в меню «Настройка на объект» менеджера программ «АМТ МЕГА», и создать скважину через меню «Скважина»/«Создать скважину», т. е. вводим площадь, номер куста и номер скважины – «Февральская», куст № 1, скважина № 214.

Далее выбираем созданную скважину «Февральская», куст № 1, скважина № 214 через меню «Скважина»/«Выбрать скважину».

Входим через меню «Настройки»/«Паспортные данные» и заполняем паспортные данные по скважине. Обязательное заполнение:

1. Местонахождение/координаты устья – альтитуда устья 8 м, альтитуда ротора – 46 м.

2. Общие сведения/категория и профиль – эксплуатационная, наклонная, радиус круга допуска – 50 м, магнитное склонение – 18 гр, допустимое сближение на кусте – 11 м.

3. Общие сведения/глубина и горизонт – проектная глубина 2400 м, фактическая глубина – 2388 м, проектная глубина по вертикали – 1670 м, фактическая глубина по вертикали – 1667 м, стратиграфический горизонт *Q*.

Остальные пункты можно заполнить потом.

Входим через меню «Настройки»/«Зоны осложнений» и заполняем таблицу по зонам осложнений по скважине (табл. 6.1).

Таблица 6.1

Зоны осложнений

Интервал, м		Технологический процесс	Название зоны осложнений
от	до		
1000	1050	Бурение	Поглощение

Для ввода данных по инклинометрии необходимо войти в меню «АРМ» менеджера программ «АМТ МЕГА». После запуска приложения выбираем скважину «Февральская», куст № 1, скважина № 214. В главном меню выбираем «Данные»/«фактические»/«профиль». Заполняем данные по скважине, т. е. вводим значения глубины, угла и азимута по скважине в табл. 6.2.

Таблица 6.2

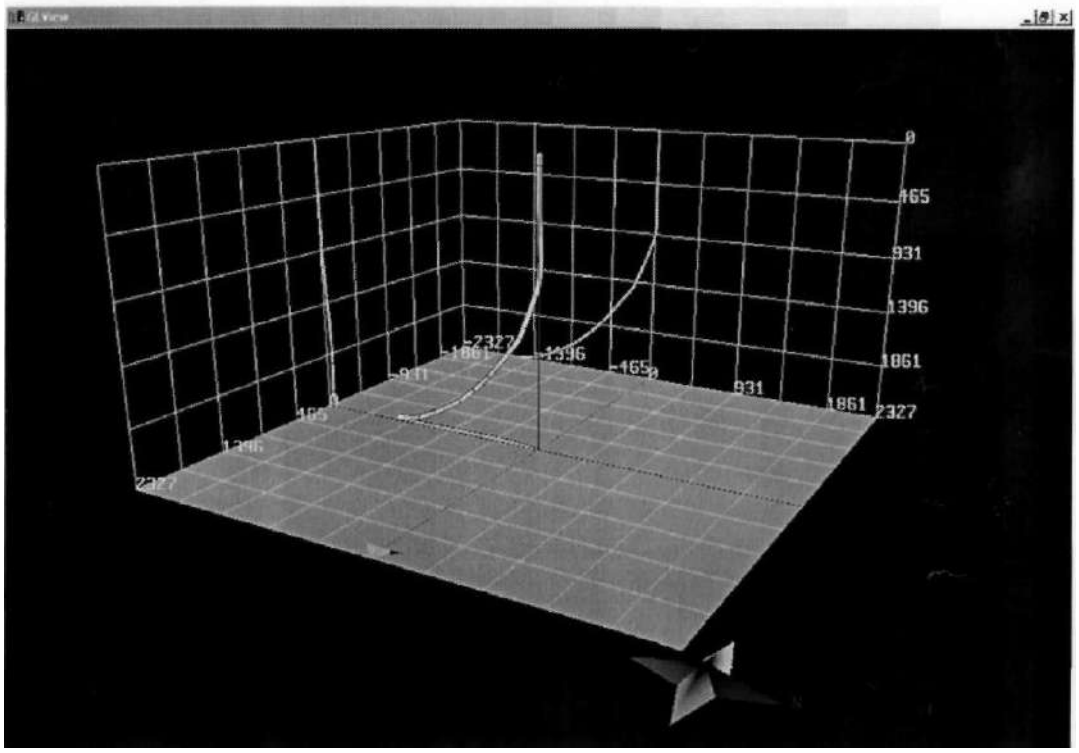
Таблица ввода данных

Глубина, м	Зенитный угол, град.	Азимут, град.	Северные координаты, м	Восточные координаты, м	Вертикальные координаты, м	Удлинение ствола, м	Смещение забоя, м	Дирекционный угол, град.	Интенсивность, град./10 м	Абсолютные отметки, м
10,00	0,00	281,00	0,00	0,00	0,00	10,00	0,00	0,00	0,00	16,70
100,00	0,18	281,00	0,15	-0,24	90,00	10,00	0,28	56,94	0,02	-73,30
300,00	0,30	281,00	0,50	-0,76	290,00	10,00	0,91	56,94	0,02	-273,30
400,00	0,30	281,00	0,78	-1,20	390,00	10,00	1,43	56,94	0,00	-373,30
500,00	2,06	281,00	2,74	-4,22	489,93	10,07	5,03	56,94	0,18	-473,23
600,00	2,06	298,00	5,50	-6,52	589,87	10,13	8,53	49,86	0,06	-573,17
800,00	1,48	285,00	9,88	-10,63	789,77	10,23	14,52	47,10	0,07	-773,07
900,00	3,30	94,06	7,35	-5,46	889,61	10,39	9,16	36,64	0,19	-872,91
1000,00	10,30	186,12	-8,41	-13,91	988,00	12,00	16,25	58,83	0,98	-971,30
1100,00	23,48	170,00	-47,38	-22,23	1079,72	20,28	52,33	25,14	1,40	-1063,02
1200,00	24,24	168,54	-87,73	-29,78	1170,90	29,10	92,65	18,75	0,10	-1154,20
1400,00	25,00	166,48	-170,26	-41,15	1352,71	47,29	175,17	13,59	0,10	-1336,01
1500,00	27,48	168,36	-215,65	-49,49	1441,43	58,57	221,25	12,93	0,26	-1424,73
1600,00	39,06	165,00	-278,18	-57,24	1519,08	80,92	284,01	11,63	1,17	-1502,38
1700,00	43,18	162,24	-346,42	-62,37	1592,00	108,00	351,99	10,21	0,45	-1575,30
1900,00	42,00	160,06	-480,33	-68,57	1740,42	159,58	485,20	8,12	0,07	-1723,72
2000,00	43,36	157,36	-548,98	-67,88	1813,12	186,88	553,16	7,05	0,23	-1796,42
2100,00	47,54	156,42	-622,73	-65,92	1880,63	219,37	626,21	6,04	0,42	-1863,93

Окончание таблицы 6.2

Глубина, м	Зенитный угол, град.	Азимут, град.	Северные координаты, м	Восточные координаты, м	Вертикальные координаты, м	Удлинение ствола, м	Смещение забоя, м	Дирекционный угол, град.	Интенсивность, град./10 м	Абсолютные отметки, м
2200,00	49,54	157,36	-698,82	-65,15	1945,52	254,48	701,85	5,33	0,21	-1928,82
2400,00	54,24	158,24	-859,08	-66,24	2065,11	334,89	861,63	4,41	0,19	-2048,41
2500,00	59,36	156,06	-945,07	-63,41	2116,08	383,92	947,20	3,84	0,54	-2099,38
2600,00	62,48	156,48	-1033,73	-61,15	2162,28	437,72	1035,54	3,39	0,31	-2145,58
2700,00	65,18	154,24	-1124,30	-55,30	2204,26	495,74	1125,66	2,82	0,34	-2187,56
2900,00	67,24	160,42	-1308,47	-57,78	2282,02	617,98	1309,74	2,53	0,32	-2265,32
3000,00	76,12	166,24	-1404,53	-71,79	2306,01	693,99	1406,37	2,93	1,05	-2289,31
3100,00	81,42	165,54	-1502,54	-84,87	2320,93	779,07	1504,94	3,23	0,53	-2304,23
3190,00	86,24	165,00	-1591,67	-95,91	2326,83	863,17	1594,56	3,45	0,54	-2310,13

а



б

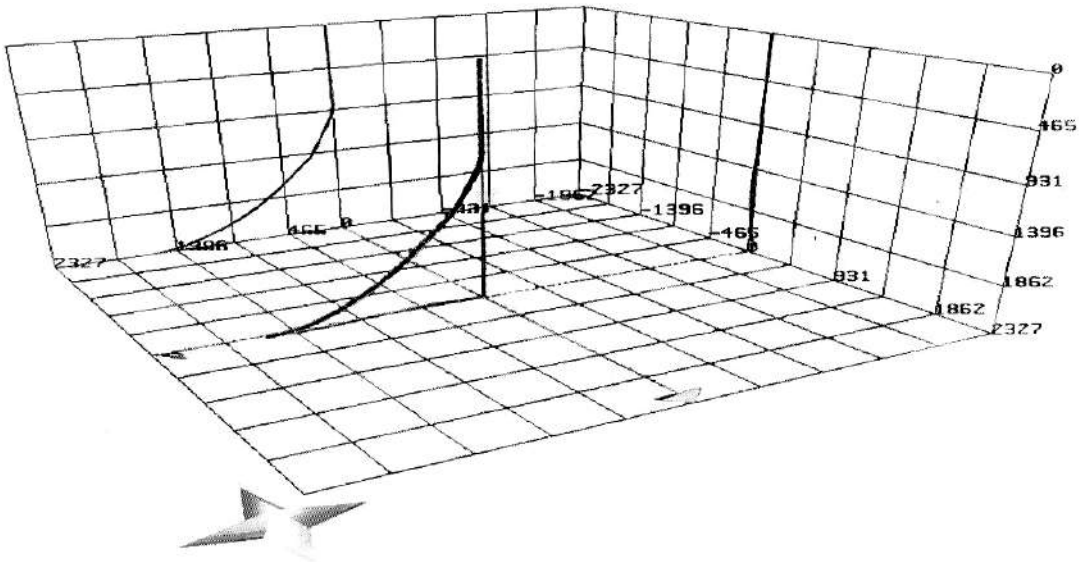


Рис. 6.1. Пространственное изображение горизонтальной скважины

После заполнения данных выбираем «Метод расчета профиля»/ «Метод осреднения углов». Можно выбрать и другой метод расчета, так как метод выбирается по согласованию с

Заказчиком. Программа рассчитывает по введенным значениям параметры согласно нижеприведенной табл. 6.2 и рис. 6.1.

Задание

1. Ввести данные инклинометрии в программу «АМТ МЕГА».
2. Провести интерпретацию по предложенной схеме.
3. Вывести изображение скважины на экран.
4. Проанализировать полученный результат.
5. Написать пояснительную записку.

Контрольные вопросы

1. Каков назначение метода инклинометрии?
2. Объясните принцип работы инклинометра-акселерометра.
3. Какие знаете принципы работы инклинометров?
4. Какие бывают зоны осложнений в процессе бурения?
5. Дайте определение зенитному и азимутальному углу скважин.
6. Каково допустимое сближение скважин на кусте?
7. Каково требование при бурении горизонтальных скважин к попаданию в горизонтальный круг?

Работа 7. ПОСТРОЕНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННОГО РАЗРЕЗА ПО ДИАГРАММАМ АМК «ГОРИЗОНТ»

1. Краткое описание

Для наиболее точного представления о строении продуктивных пластов и месторождения в целом на месторождении Комсомольском предусматривается построение корреляционных разрезов с использованием данных геофизических исследований наклонных и горизонтальных скважин.

Исходя из ранее проведенных исследований, наиболее перспективными для доразведки и применения современных технологий горизонтального бурения считаются нефтеносные коллекторы, находящиеся в нижнемеловых отложениях Покурской свиты. К таким коллекторам относятся продуктивные пласты ПК18, ПК19 и ПК22. Наибольший интерес для нефтяников представляет продуктивный пласт ПК 18(1).

Для полного использования данных ГИС и правильной интерпретации необходимо проводить их тесную увязку со стратиграфическим расчленением, литологической характеристикой и структурной особенностью данного месторождения. Обработка многочисленных геофизических материалов ранее проводимых исследований позволила построить структурную карту по кровле продуктивного горизонта на Комсомольском месторождении нефти по пласту ПК18(1) (рис. 7.1). Данное месторождение достаточно хорошо изучено, особенно в центральной его части.

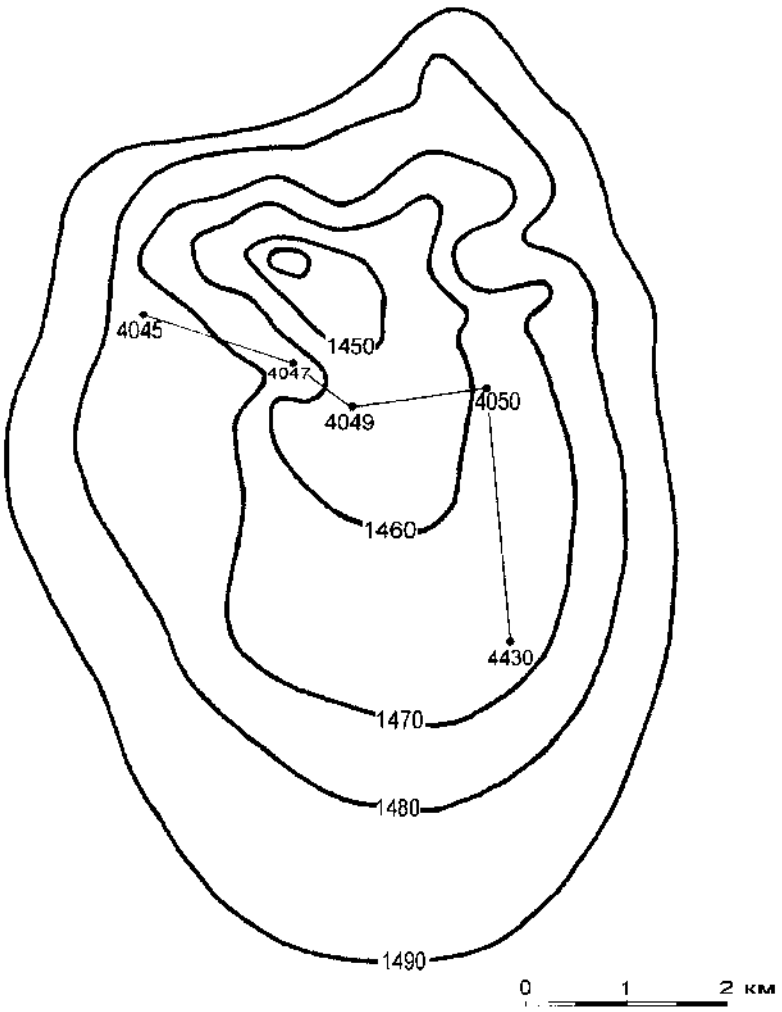


Рис. 7.1. Структурная карта по кровле пласта ПК18(1)
(по материалам ООО «Сургутнефтегаз»)

Для того чтобы проследить характер залегания продуктивного пласта ПК18(1) и его мощность, были проведены измерения в горизонтальных стволах аппаратурой АМК «ГОРИЗОНТ».

В скважинах № 4045, № 4049, № 4050 был проведен полный комплекс исследований, включающий методы КС, ПС, ГК, НГК и инклинометрии. Современные компьютерные технологии позволяют диаграммы по горизонтальной части ствола скважины привести к вертикали для удобства привязки к геологическому разрезу и между собой.

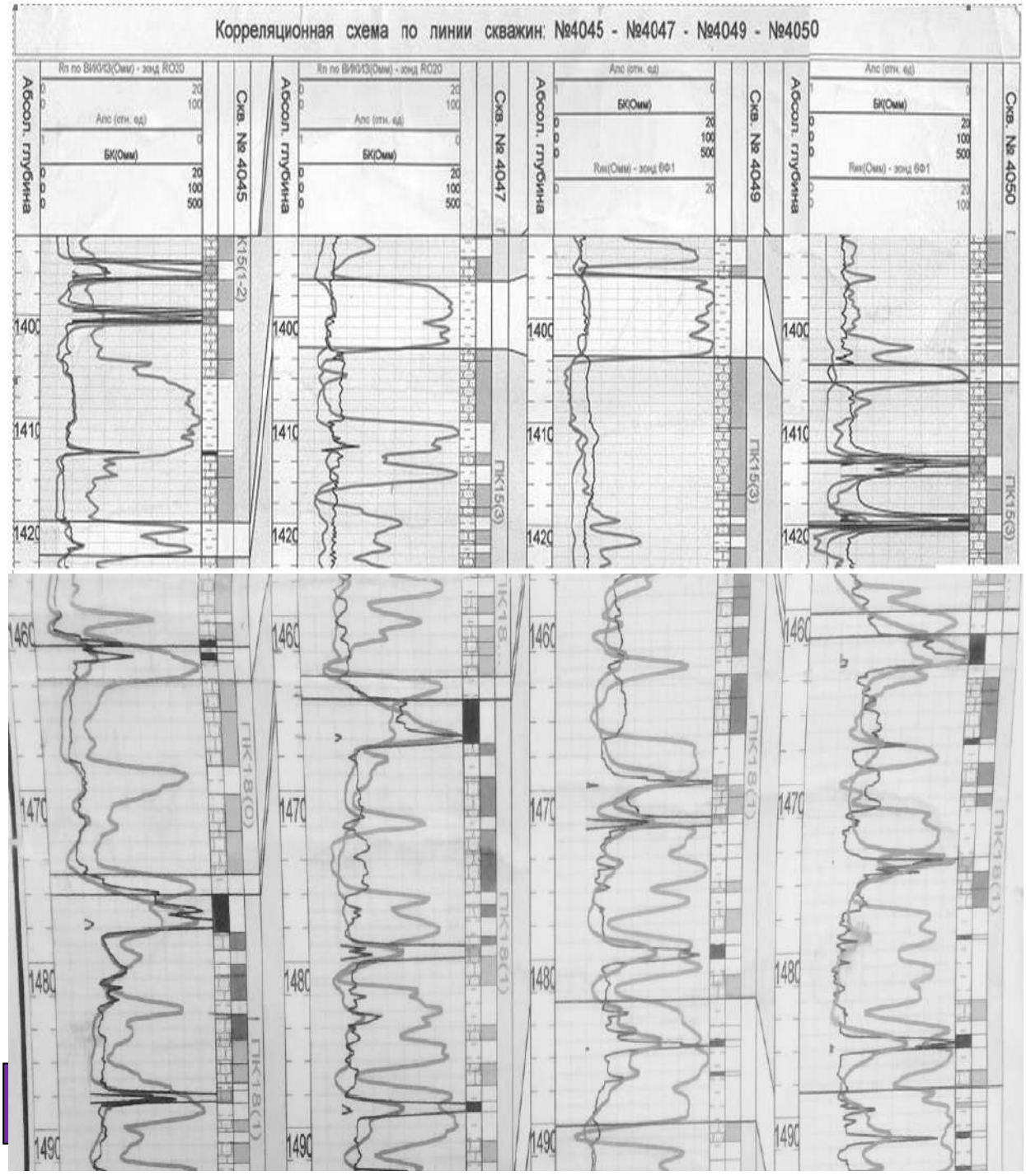


Рис. 7.2. Выбор геологического репера.

Условные обозначения:

$R_{ик}$ – кажущееся удельное электрическое сопротивление пласта по ИК, в Ом·м;

$R_{п}$ – удельное электрическое сопротивление пласта, Ом·м;

$A_{пс}$ – коэффициент снижения самопроизвольной поляризации ПС, отн. ед.;

БК – кажущееся удельное сопротивление по БК, Ом·м

скв. 4045 скв. 4047 скв. 4049 скв. 4050 скв. 4430

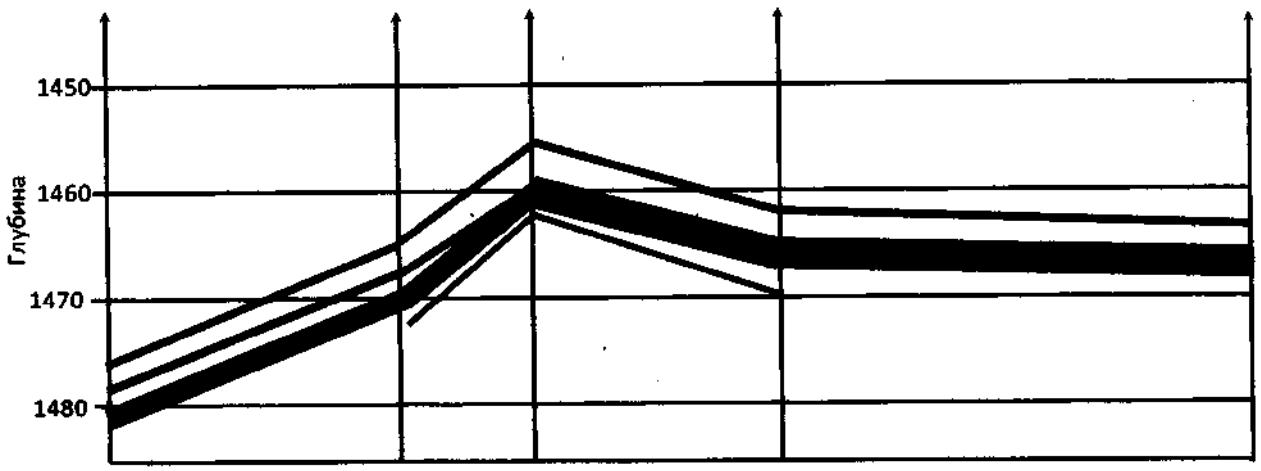


Рис. 7.3. Кореляционный разрез

Для наиболее полного представления о строении продуктивного пласта необходимы кривые каротажа по скважине № 4430.

Данные исследования обеспечивают выделение стратиграфических реперов и разделение разреза на литолого-стратиграфические комплексы и типы (терригенный, карбонатный, кристаллический и т. д.); идентификацию литолого-стратиграфических комплексов, к которым приурочены продуктивные и/или перспективные на нефть и газ отложения; расчленение разреза на пласты, их привязку по относительным и абсолютным отметкам глубины, внутри- и межплощадную корреляцию разрезов. В производственных условиях обработка материалов каротажа производится при помощи пакета геодезических программ «ГеоПоиск». Пример выбора геологического репера приводится на рис. 7.2. В результате проведенной интерпретации может быть получен корреляционный разрез (рис. 7.3).

Задание

1. Выбрать опорные пласты. Для этого использовать пласты глин, прослеживающиеся по всему разрезу (достаточно два опорных пласта глин).

2. Выделить угольный пласт, представляющий собой в данном разрезе покрышку нефтяного месторождения, использовать его так же, как опорный.

3. Выделить все нефтеносные пласты в разрезе, применяя каротажные диаграммы пяти скважин: 4045, 4049, 4047, 4050, 4430.

4. Построить корреляционный разрез. Рекомендуемый вертикальный масштаб 1:500, горизонтальный масштаб 1:4000. Проанализировать тип структуры, максимальное

возвышение относительно своих границ, строение месторождения по высоте, мощности нефтеносных пластов.

Контрольные вопросы

1. Что такое стратиграфический репер?
2. Что такое покрышка нефтяного месторождения?
3. Как определить размеры месторождения, используя структурную карту по одному из продуктивных пластов?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Автономная геофизическая система* АГС «Горизонталь» / Рекламный проспект. ОАО НПФ «Геофизика». – Режим доступа: http://www.npf-geofizika.ru

2. *Акбулатов Т. О., Левинсон Л. М., Самигуллин В. Х.* Телеметрические системы для бурения направленных скважин. – 2-е изд. перераб. и доп. – Уфа: БашНИПИнефть, 2004. – 59 с.

3. *АМК «Горизонт»* / Рекламный проспект. – Октябрьский: ВНИИГИС.

4. *Геофизическая лаборатория* АМК «Горизонт» / Рекламный проспект. – Октябрьский: ВНИИГИС.

5. *Технология геофизических исследований* ГС автономной аппаратурой на бурильных трубах на примере использования АМК «Горизонт» / Л. Г. Леготин, С. В. Вячин, А. М. Султанов и др. // НТЖ АИС «Каротажник». – № 113. – 2003.

6. *Лукъянов Э. Е., Хаматдинов Р. Т.* Аппаратурно-методический комплекс для проведения ГИС в горизонтальных скважинах АМАК «Обь» // НТЖ АИС «Каротажник». – № 30. – 1997.

7. *Леготин Л. Г., Султанов А. М., Вячин С. В.* Применение АМК Горизонт для геофизических исследований ГС // НТЖ АИС «Каротажник». – № 36. – 1997. – С. 85-92.

8. *Леготин Л. Г., Султанов А. М., Вячин С. В.* АМК «Горизонт-100» для геофизических исследований скважин малого диаметра и боковых стволов // НТЖ АИС «Каротажник». – № 51. – 1998.

9. *Леготин Л. Г., Султанов А. М., Вячин С. В.* Аппаратурно-методический комплекс АМК «Горизонт-90» для исследования гори-

зонтальных скважин и боковых стволов // НТЖ АИС «Каротажник». – № 86. – 2001.

10. *АМК «Горизонт-ВАК-90»* для исследования горизонтальных стволов методов волнового акустического каротажа / Л. Г. Леготин, А. М. Султанов, В. Н. Еникеев, В. Г. Рафиков, И. В. Кузьмин // НТЖ АИС «Каротажник». – № 96. – 2002.

11. *Молчанов А. А., Лукъянов Э. Е., Рапин В. А.* Геофизические исследования горизонтальных нефтегазовых скважин: учебное пособие. – СПб.: МАНЭБ, 2001. – 298 с.

12. *Молчанов А.А., Абрамов Г. С.* Бескабельные измерительные системы для исследований нефтегазовых скважин: теория и практика / под общ. ред. А. А. Молчанова. – М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2004. – 515 с.

13. *Рекламный проспект станции* геолого-технологического контроля бурения и исследования скважин «МЕГА АМТ». – Мегион: Изд-во «Тюменьпромгеофизика», 2002. − 18 с. – Руководство оператора по программе регистрации данных. – Уфа: Изд-во «Эликом», 2007. − 37 с. – Режим доступа: http://amt-s.spb.ru/amt121.html

14. *Станция бескабельного каротажа* СБК «АМАК» / Научно-производственное предприятие по геофизическим работам, строительству и заканчиванию скважин (ОАО НПП «ГЕРС»). – Тверь, 2003. – 33 с. – Режим доступа: http://www.gers.ru http://www.geo.oilru.ru/catalog/group/product/?2162

15. *Стрельченко В. В.* Геофизические исследования скважин: учебник. – М.: Недра-Бизнесцентр, 2008. – 551 с.

16. *Термогазохимическое воздействие* на малодебитные и осложнённые скважины / Г. А. Чазов, В. И. Азаматов, С. В. Якимов, А. И. Савич. – М.: Недра, 1986. – 153 с. – Режим доступа: http://www.twirpx.com/file/964637/

17. *Ярулин Р. К. Валиуллин Р. А.* Методические рекомендации по геофизическим исследования действующих горизонтальных скважин / Разработаны специалистами ООО НПР «ГЕОТЭК» (г. Уфа) в рамках выполнения ОМР по договору № БНФ/9/3 – 1/8/328/04/ПРУ.

18. *ЗАО Научно-производственное предприятие* геофизической аппаратуры «Луч». Продукция. – Новосибирск, 2013. – Режим доступа: http://looch.ru/products/index.html

19. *Рекламный проспект* станции геолого-технологического контроля бурения и исследования скважин «МЕГА АМТ». – Мегион: Изд-во «Тюменьпромгеофизика», 2002. – 18 с.Учебное издание

Надежда Владимировна БЛИНКОВА
Николай Сергеевич ЗЕМЦОВ

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИН

Методические указания
к лабораторным и практическим работам
по дисциплине «Геофизические методы
исследования горизонтальных скважин»
для студентов специальности
21.05.03 Технология геологической разведки,
специализации «Геофизические методы
исследования скважин (ГИС)»
всех форм обучения

Редактор *Н. Л. Сайгина*
Компьютерная вёрстка *Н. Л. Сайгиной*

Подписано в печать 04.05.2018 г.
Бумага писчая. Формат бумаги 60 × 84 1/16. Печать на ризографе.
Печ. л. 4,5. Уч.-изд. л. 2,4. Тираж 50 экз. Заказ №

Издательство УГГУ
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30.
Отпечатано с оригинал-макета
в лаборатории множительной техники УГГУ

Министерство образования и науки РФ

ФГБОУ ВО

«Уральский государственный горный университет»

А. Г. Талалай

Комплексная интерпретация геофизических данных

Методические указания
по выполнению индивидуальных заданий курса
«Комплексная интерпретация
геофизических данных»
для студентов специальности
21.05.03 Технология геологической разведки
специализации
Геофизические методы исследования скважин

Екатеринбург
2020

Министерство образования и науки РФ

ФГБОУ ВО

«Уральский государственный горный университет»

ОДОБРЕНО
методической комиссией
факультета геологии и геофизики
Председатель комиссии



_____ В. И. Бондарев
«20» марта 2020 г.

Комплексная интерпретация геофизических данных

Методические указания
по выполнению индивидуальных заданий курса
«Комплексная интерпретация
геофизических данных»
для студентов специальности
21.05.03 Технология геологической разведки
специализации
Геофизические методы исследования скважин

Методические указания по выполнению индивидуальных заданий по курсу «Комплексная интерпретация геофизических данных» для студентов специальности 21.05.03 Технология геологической разведки, специализации «Геофизические методы исследования скважин»

Методические указания содержат работы по построению физико-геологической модели объекта поисков, статистической обработке результатов измерений физических свойств горных пород, оценке геологической информативности геофизических методов, выделению аномалий на фоне нормальных значений геофизических полей и комплексной интерпретации геофизических наблюдений с и пользованием функции комплексного показателя.

Методические указания предназначены для студентов 21.05.03 Технология геологической разведки, специализации Геофизические методы исследования скважин.

Составитель: А. Г. Талалай, проф., д.г.-м.н.

I. Работа № I. ПОСТРОЕНИЕ АПРИОРНОЙ ФГМ ОБЪЕКТА ПОИСКОВ

Под физико-геологической моделью объекта геофизических поисков (ФГМ) понимается абстрактное возмущающее тело, обобщенные размеры, форма и физические свойства которого с той или иной степенью приближения аппроксимируют реальные геологические и рудные образования, подлежащие обнаружению. ФГМ является обобщенным, типизированным и формализованным представлением о целой группе подобных геологических объектов. Это абстракция типа "описание-обобщение".

От реальных геологических объектов ФГМ отличается определенными размерами и обобщенной формой. Сложные по морфологии и вещественному составу геологические объекты заменяются сочетанием геометрически правильных объектов (сфера, цилиндр) с измеренными статистически усредненными физическими свойствами. Это позволяет использовать простые алгоритмы для решения обратных задач на ЭВМ.

ФГМ характеризуется следующими свойствами: носит вероятностный характер, обусловленный стохастичностью используемых для ее построения геологических и петрофизических данных, отличается простотой расчета ожидаемых физических полей, характеризуется схематизированным и обобщенным характером полей, которые отражают наиболее существенные черты данного класса объектов.

Физико-геологическая модель должна соответствовать целям и задачам геофизических исследований, типу района поисков и условиям ведения работ, отражать состояние геолого-геофизической изученности данного класса объектов, отличаться по физическим свойствам от вмещающих пород и характеризоваться оптимальной сложностью.

Отличительной чертой ФГМ является ее полиморфность в отношении физических свойств и геометрических параметров объекта. Количественные параметры ФГМ зависят от факторов, которые можно объединить в три группы: физические свойства пород и руд (x_1, x_2, x_3 ...), размеры объекта (y_1, y_2, y_3 ...) и его форма (z_1, z_2, z_3 ...). Например, крутопадающая линза сплошных медноколчеданных руд является в одно и то же время проводящим электрический ток пластом с положительной избыточной плотностью, сжатым эллипсоидом с повышенной поляризуемостью, генератором естественного электрического поля, источником формирования ореолов рассеяния меди и т.д. Пример физико-геологической модели линзы медноколчеданных руд (по данным Г.С.Вахромеева) приведен на рис.I.

Построение априорной ФГМ объекта поисков производится на базе справочных и литературных источников. При построении используются принципы аналогии, корреляции и обратной связи.

Принцип аналогии состоит в том, что выбор модели объекта исследований производится на основе данных, полученных на объектах со сходными геолого-геофизическими условиями. Как показывает практика ФГМ, разработанная на примере месторождения определенного класса крупности по запасам (например, среднего), может быть справедлива для аналогичных месторождений других классов крупности (например, мелких) при условии кратного изменения размеров, формы и физических свойств модели и сохранения общих условий залегания месторождений (мощность рыхлых отложений, перекрывающих и подстилающих пород).

Принцип корреляции состоит в использовании регрессионных зависимостей параметров и физических свойств объекта исследований от наблюдаемых физических полей и от других физических свойств того же объекта. Например, при разведке железорудных месторождений можно использовать связь между магнитной восприимчивостью и содержанием железа в руде. Установлены связи между скоростью распространения продольных волн и плотностью, между электрическим сопротивлением, скоростью продольных волн и плотностью, между плотностью и магнитной восприимчивостью. Например, Н.Н.Пузыревым установлена взаимосвязь скорости и плотности в виде $V = 6\sigma - 11$, связь эта может меняться в зависимости от возраста горных пород и района исследований. В поверженных породах по мере роста основности возрастают плотность и намагниченность. Породы осадочного происхождения характеризуются обратной зависимостью плотности, электрического сопротивления и скорости распространения упругих волн от пористости и т.д.

Принцип обратной связи заключается в использовании результатов обработки и интерпретации материалов экспериментальных полевых исследований с целью совершенствования ФГМ. Полученные в результате интерпретации геофизических измерений геологические выводы используются для уточнения физических свойств, размеров и формы

объекта исследований.

Физические свойства пород и руд определяются путем исследования образцов, по данным каротажа, параметрических измерений в обнажениях и по итогам интерпретации полевых геофизических методов. Данные о физических свойствах должны характеризовать все необходимые физические параметры, обеспечивающие построение комплексной ФГМ, обеспечивать по точности измерений решение поставленной геологической задачи, иметь пространственную и геологическую привязку, быть представительными для статистической обработки, т.е. замеры должны быть массовыми и достаточно представительными. Сведения о размерах и форме объекта поисков получат при его разведке.

I.I. Задание

Построить априорную физико-геологическую модель объекта геофизических поисков, используя для этой цели основные принципы построения ФГМ, материалы преддипломной производственной практики, справочники по физическим свойствам и литературные источники.

I.2 Содержание работы

Составить объяснительную записку, в которой сформулировать геологические задачи, которые ставятся перед геофизическими исследованиями в районе работ, например: поиски и разведка месторождений полезных ископаемых, опробование горных пород и руд, определение процентного содержания полезных компонентов, уточнение геологического разреза по измерениям в скважинах и т.д. Разделить геологические задачи на основные и дополнительные. Перечислить материалы, на основе которых строится ФГМ.

Оценить геологические условия региона и участка работ. Дать характеристику горных пород региона и участка, проанализировать размеры и условия залегания геологических объектов, вещественный состав и наличие минералов, оказывающих влияние на физические свойства горных пород района. Охарактеризовать предполагаемый объект поисков: его физические свойства, размеры, форму, глубину залегания рудных тел, запасы руды, наличие перекрывающих и подстилающих горных пород, глубины и типы коры выветривания, мощность поверхностных рыхлых отложений, наличие ореолов рассеяния элементов, рельеф местности и т.д.

Проанализировать результаты предшествующих геофизических работ в районе и аналогичных районах, физические и геологические предпосылки, характер аномальных и нормального полей, установить регрессионные зависимости параметров и физических свойств объекта поисков от наблюдаемых физических полей и других физических свойств того же объекта. Обработать и проинтерпретировать данные предшествующих экспериментальных геофизических исследований с целью уточнения физических свойств, размеров и формы объекта исследований.

На основании имеющихся материалов и литературных источников составить априорную физико-геологическую модель объекта поисков. Результаты работы обобщить и представить в форме таблицы I.

I.3. Материалы и оборудование

I.3.I. Геологические карты региона и участка работ

Результаты геофизических исследований района работ: графики измерений физических полей по профилям, карты физических полей с нанесенными изолиниями равных значений потенциала поля, карты векторов напряженностей физических полей, вариационные кривые и гистограммы физических свойств горных пород и руд, корреляционные зависимости физических свойств от вещественного состава горных пород и другие материалы производственных практик.

I.3.2 Микрокалькулятор типа Б3-2I

I.4. Порядок выполнения работы

1) Ознакомиться с понятием физико-геологической модели по настоящей инструкции.

2) Сформулировать геологические задачи.

3) Оценить физические свойства, размеры и форму предполагаемого объекта поисков.

4) Проанализировать, обработать и проинтерпретировать результаты предшествующих геофизических работ в районе. Рассчитать вариационные кривые и построить гистограммы физических свойств объекта поисков.

5. Составить объяснительную записку.

I.5. Содержание отчета

В отчете следует сформулировать геологические задачи, стоящие перед геофизическими методами в районе работ.

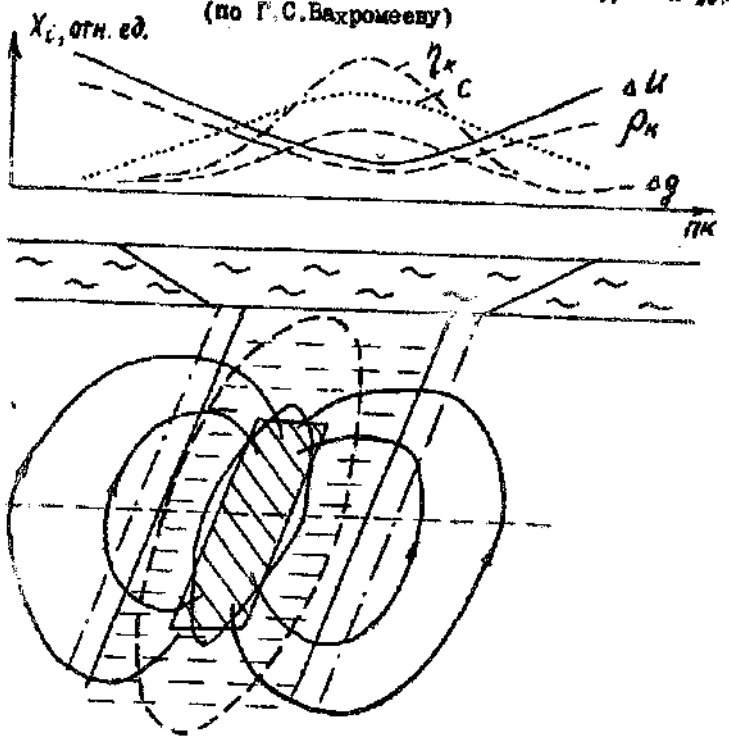
Кратко указать значение выбранного объектом поисков полезного ископаемого для народного хозяйства. Дать определение ФПМ. Привести сведения о физических свойствах, размерах и форме искомого объекта. Отчет должен содержать графики исходных данных, необходимых для построения ФПМ, результаты измерений геофизических полей по профилям или в плане, расчетные или взятые из справочников таблицы физических свойств и итоговое, схематизированное обобщенное описание комплексной полиморфной ФПМ в виде таблицы I.

Таблица I

Параметры физико-геологической модели объекта геофизических поисков

Физические свойства ($x_1, x_2, x_3 \ldots$)	Размеры ($y_1, y_2, y_3 \ldots$)	Форма ($z_1, z_2, z_3 \ldots$)
x_1 Магнитная восприимчивость $\varkappa$	y_1 Горизонтальная мощность $2b$	z_1 Показатель горизонтальной протяженности $L/2b$
x_2 Остаточная намагниченность J_n	y_2 Глубина залегания верхней кромки h	z_2 Показатель вертикальной протяженности $\frac{H-h}{L}$
x_3 Избыточная плотность $\Delta\sigma$	y_3 Глубина залегания нижней кромки H	z_3 Показатель погруженности $\frac{H-h}{2b}$
x_4 Удельное электрическое сопротивление ρ	y_4 Длина по простиранию L	
x_5 Поляризуемость η	y_5 Угол падения α	
x_6 Естественная радиоактивность J	y_6 Радиус (для изометрических тел) R	z_4 Показатель изометричности $c:d:b$
x_7 Скорость распространения упругих колебаний v	y_7 Размеры по большой c, средней d и малой b осям (для трехмерных объектов)	. . . .
x_8 Длина замедления быстрых нейтронов L_s	y_8 Расстояние до центра H_u	
x_9 Длина диффузии тепловых нейтронов L	. . . . .	
. . . . .		

Физико-геологическая модель линзы медноколчеданных руд (по Г.С.Вахромееву)



1 – 2 – 3 – 4 – 5

6 – 7 – 8 – 9

I – контур промышленной залежи, 2 – наклонный пласт положительной избыточной плотности, 3 – зона повышенной проводимости, 4 – контур сжатого эллипсоида повышенной поляризуемости, 5 – первичный ореол рассеяния элементов, 6 – вторичный ореол рассеяния элементов, 7 – токовые линии естественного электрического поля, 8 – уровень подземных вод, 9 – современный эловно-делювий

Δg – аномалия силы тяжести, $\rho_к$ – аномалия электрического сопротивления, $\eta_к$ – аномалия вызванной поляризации, ΔU – аномалия естественного поля, C – аномалия содержания меди.

Рис. I

2. РАБОТА № 2

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД

Необходимым и достаточным условием успешного применения геофизических методов является заметная дифференциация (контрастность) физических свойств горных пород в районе работ. Физические свойства пород зависят от многих геологических факторов: возраста, глубины залегания, метаморфизма горных пород, степени их выветренности, пористости, влагонасыщенности и т.д. По этой причине частные значения физических параметров обычно колеблются в широких пределах. Для получения достаточной представительности результатов необходимо, чтобы измерения носили массовый характер. Для каждой разновидности горных пород желательно иметь не менее 30–50 определений.

Перечень основных физических свойств горных пород и руд приведен в таблице 2.

Физические свойства определяются обычно путем исследований на образцах, в естественном залегании (параметрические замеры), по данным каротажа и по итогам интерпретации результатов полевых геофизических наблюдений соответствующими методами. Образцы берут из коренных обнажений пород и руд, по возможности слабо затронутых вторичными процессами. Места отбора образцов равномерно распределяют по площади и отмечают на карте с целью изучения закономерностей изменения физических параметров по площади исследования.

Изменчивость физических свойств пород и руд обуславливает широкое использование статистических методов обработки с целью компактного представления данных о физических свойствах, выявления в общей совокупности самостоятельных групп пород, определения доверительных границ изменения физических параметров горных пород, установления корреляционной зависимости между различными физическими параметрами и изучения зависимости физических свойств от состава и структуры горных пород.

2.I. Эмпирические распределения

Множество значений физического признака, обладающего свойствами случайной величины, будем называть статистической совокупностью. В статистической совокупности значения физического признака располагаются в порядке их получения и записи при изучении геологического

Таблица 2

Перечень основных физических свойств горных пород

Метод	Физический параметр	Единица измерения
Магниторазведка	I. Магнитная восприимчивость, $\varkappa$	$СИ_{\varkappa}$
	2. Остаточная намагниченность,	А/м
Гравиразведка	I. Плотность, σ	г/см^3
Электроразведка	I. Удельное электрическое сопротивление, ρ	Ом м
	2. Поляризуемость, η	%
Сейсморазведка	I. Скорость распространения упругих колебаний, v	м/с
	2. Модуль Юнга	кг/м^2
Радиометрия	I. Естественная радиоактивность, J	мкр/ч
	2. Коэффициент радиоактивного равновесия, kpp	
	3. Коэффициент эманирования, α	%
Ядерная геофизика	I. Длина замедления быстрых нейтронов, L_s	см
	2. Длина диффузии тепловых нейтронов, L_d	см
	3. Время замедления быстрых нейтронов, τ_s	с
	4. Время жизни тепловых нейтронов, τ	с

объекта поисков. Для удобства математической обработки производят упорядочение статистической совокупности, которое заключается в том, что отдельные значения признака располагают в возрастающем или убывающем порядке. Упорядочение совокупностей непрерывных физических признаков производится методом группирования и последующего построения вариационных рядов и соответствующих им графиков.

Упорядочение непрерывных физических признаков производится в интервальной форме. Число интервалов K можно оценить по формуле $K = \sqrt{N}$, где N – объем совокупности равный общему числу наблюдений. Для выбора ширины интервала группирования используется формула Стреджесса:

$$\Delta x = \frac{x_{max} - x_{min}}{1 + 3{,}3 \lg N}$$

где x_{max}, x_{min} – максимальное и минимальное значение физического параметра x. Вычисленные значения Δx округляют до удобной величины.

Вариационный ряд статистической совокупности непрерывного физического признака представляется в виде таблицы, в которой в возрастающем порядке перечислены интервалы или середины интервалов группирования и соответствующие им частоты и частости встречи физических признаков. Перед составлением таблицы вычисляют значения середины интервалов $x_i = \frac{a_i + b_i}{2}$, где a_i и b_i, соответственно, начало и конец i-го интервала группирования, подсчитывают частоту n_i и частость $\omega_i = n_i/N$ попадания физического признака на i-ый интервал группирования. Пример построения вариационного ряда приведен в таблице 3. Проверка правильности построения вариационного ряда осуществляется по формулам $\sum_{i=1}^{K} n_i = N$, $\sum_{i=1}^{K} \omega_i = 1$.

Для компактного и наглядного представления результатов массовых измерений физических свойств горных пород вариационный ряд может быть представлен графически в виде полигона, гистограммы или кумуляты.

Полигоном называется ломаный график, построенный в декартовой системе координат. По оси абсцисс откладываются в возрастающем порядке середины интервалов группирования физического параметра, а по оси ординат соответствующие им частоты или частости.

Таблица 3

Вариационный ряд распределения плотности перидотитов Баженовского месторождения хризотил-асбеста

Номера интервалов,	Границы интервалов, г/см³	Середина интервалов x_i, г/см³	Частоты n_i	Частости $\omega_i = \frac{n_i}{N}$
1	2,5-2,7	2,6	2	0,04
2	2,7-2,9	2,8	6	[illegible]
3	2,9-3,I	3,0	8	0,16
4	3,I-3,3	3,2	I3	0,26
5	3,3-3,5	3,4	II	0,22
6	3,5-3,7	3,6	7	0.14
			$N=50$	$\sum_{i=1}^{K} \omega_i = 1,0$

Гистограммой вариационного ряда называется ступенчатый график, состоящий из серии примыкающих друг к другу прямоугольников с основаниями на оси абсцисс, равными ширине интервала группирования, и высотами по оси ординат, соответствующими значениями частот или частостей.

Кумулятой называют монотонно растущий график, который образуется, если по оси абсцисс откладывать середины интервалов группирования, а по оси ординат сумму частот или частостей с нарастающим итогом.

Пример построения полигона, гистограммы и кумуляты вариационного ряда распределения плотности перидотитов Баженовского месторождения хризотил-асбеста приведен на рис. 2.

Наряду с построением вариационных рядов и графиков при обработке результатов измерений физических свойств вычисляются статистические характеристики положения (средняя величина, медиана, мода) и рассеяния результатов измерений (дисперсия, стандарт, коэффициент вариации, показатель асимметрии и показатель эксцесса).

Средняя величина $\bar{x}$ характеризует массовый уровень физического признака в статистической совокупности. Для вариационных рядов совокупностей с непрерывным или дискретным признаком средняя величина признака подсчитывается, как средняя взвешенная по формуле

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{K} n_i x_i}{N} \qquad (2.I)$$

где K – число интервалов или отдельных значений вариант.

Медиана (Me) – значение признака, соответствующее середине упорядоченного вариационного ряда. Медиана делит упорядоченную совокупность физических признаков на две равные по объему части.

Мода (Mo) – значение признака, которое характеризуется наибольшей частотой или частостью и совпадает с абсциссой максимума вариационной кривой.

Статистические характеристики рассеяния указывают на степень и характер концентрации или рассеяния отдельных значений физического параметра относительно характеристик положения.

Дисперсия (S^2) – это средний квадрат отклонений отдельных вариант от средней величины. Для упорядоченной в вариационный [illegible]

Пример построения полигона (а), гистограммы (б) и кумуляты (в) вариационного ряда распределения плотности перидотитов Бажеповского месторождения хризотил-асбеста

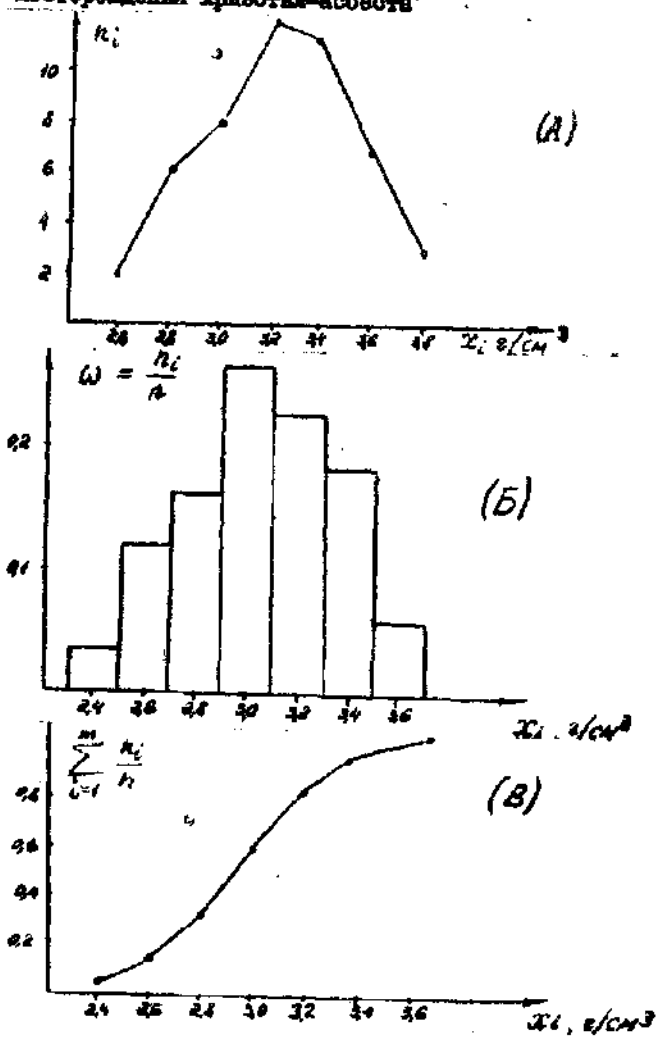


Рис. 2

совокупности дисперсия вычисляется по формуле:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^{k} n_i (x_i - \bar{x})^2}{N} \qquad (2)$$

Стандарт (S) – среднее квадратическое отклонение, равное корню квадратному из дисперсии.

Коэффициент вариации (V) – это относительное среднее квадратическое отклонение, которое подсчитывается в процентах по формуле:

$$V = \frac{S}{\bar{x}} \cdot 100 \qquad (3)$$

Показатель ассиметрии (А) указывает на характер и степень симметрии вариационной кривой. Для упорядоченной совокупности показатель асимметрии вычисляется по формуле:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^{k} n_i (x_i - \bar{x})^3}{S^3 N} \qquad (4)$$

Показатель эксцесса (Э) характеризует степень крутовершинности вариационной кривой по отношению к вершине кривой нормального распределения. Для вариационных рядов эксцесс вычисляют по формуле:

$$Э = \frac{\sum_{i=1}^{k} n_i (x_i - \bar{x})^4}{S^4 N} - 3 \qquad (5)$$

Все статистические характеристики, кроме моды и медианы, вычисляются методом моментов. Статистический момент порядка ρ подсчитывается по формуле:

$$M_\rho = \frac{\sum_{i=1}^{k} n_i \sigma_i^{\rho}}{N} \qquad (6)$$

где $\sigma_i = x_i - x_0$ – отклонение i-го интервала вариационного ряда x_i от интервала x_0, принятого за начало отсчета, k – количество интервалов вариационного ряда.

Различают начальные m_ρ и центральные μ_ρ моменты вариационного ряда. Момент называется начальным, если начало отсчета совпадает с нулем $x_0 = 0$ и центральным, если начало отсчета

совпадает со средней величиной ряда $x_0 = \bar{x}$.

Первый начальный момент совпадает со средним взвешенным значением измеряемого физического параметра. Второй центральный момент совпадает с дисперсией значений физического параметра.

Частные от деления центральных моментов ρ -го порядка на стандарт в ρ -ой степени называют основными моментами $\beta_\rho = \mu_\rho / S^\rho$. Третий основной момент β_3 соответствует показателю ассиметрии, четвертый основной момент β_4 используется для вычисления показателя эксцесса.

Вычисление статистических характеристик выполняется в следующем порядке. После составления вариационного ряда и занесения данных в таблицу вычисляют условные варианты, нормированные к ширине интервала группирования, по формуле:

$$\delta_i = \frac{x_i - x_0}{\Delta x} \qquad (7)$$

где x_i - середина i -го интервала вариационного ряда, x_0 - принятое начало отсчёта, Δx - ширина интервала группирования.

Вычисляют начальные моменты условных вариант m_ρ^δ до четвертого порядка включительно по формуле:

$$m_\rho^\delta = \frac{\sum_{i=1}^{k} n_i \delta_i^\rho}{N} \quad (\rho = 1,2,3,4) \qquad (8)$$

Вычисляют среднее значение физического параметра по формуле:

$$\bar{x} = x_0 + \Delta x\, m_1^\delta \qquad (9)$$

Вычисляют второй, третий и четвертый центральные моменты, используя формулы их связи с начальными моментами условных вариант

$$\mu_2 = (\Delta x)^2 \left[m_2^\delta - (m_1^\delta)^2 \right] = S^2. \qquad (10)$$

$$\mu_3 = (\Delta x)^3 \left[m_3^\delta - 3 m_2^\delta m_1^\delta + 2 (m_1^\delta)^3 \right] \qquad (11)$$

$$\mu_4 = (\Delta x)^4 \left[m_4^\delta - 4 m_3^\delta m_1^\delta + 6 m_2^\delta (m_1^\delta)^2 - 3 (m_1^\delta)^4 \right] \qquad (12)$$

Вычисляют стандарт S , показатель асимметрии A и показатель эксцесса $Э$ по формулам:

$$S = \sqrt{\mu_2} \qquad (13)$$

$$A = \beta_3 = \frac{\mu_3}{S^3} \qquad (14)$$

$$Э = \beta_4 - 3 = \frac{\mu_4}{S^4} - 3 \qquad (15)$$

Для вариационного ряда нормального распределения $\beta_4 = 3$. Поэтому при оценке крутовершинности вариационной кривой из основного момента четвертой степени вариационной кривой вычитается основной момент четвертой степени нормального распределения физического параметра.

Вычисляют коэффициент вариации по формуле (2.3).

Подсчитывают значение моды по формуле:

$$M_0 = x_{M_0} + \Delta x \left(\frac{\Delta_1}{\Delta_1 + \Delta_2} \right) \qquad (16)$$

где x_{M_0} - начало интервала группирования, в котором находится мода, Δx - ширина интервала, Δ_1 - разность частот модального и домодального интервала, Δ_2 - разность частот модального и послемодального интервала.

Подсчитывается значение медианы по формуле:

$$Me = x_{Me} + \Delta x \left(\frac{\frac{N}{2} - n_{sMe}}{n_{Me}} \right) \qquad (17)$$

где x_{Me} - начало медианного интервала, N - объем совокупности, n_{sMe} - накопленная частота интервала, предшествующего медианному, n_{Me} - частота медианного интервала. Под накопленной частотой для данного интервала понимается сумма частот, начиная с первого интервала, включая данный. Накопленная частота подсчитывается по формуле:

$$n_{s_i} = \sum_{i=1}^{S_i} n_i \qquad (18)$$

Накопленные частоты служат основой для построения интегрального полигона (кумуляты) вариационного ряда.

Пример. Вычислить статистические характеристики вариационного ряда распределения содержания железа в сплошных медноколчеданных рудах Гайского месторождения меди.

Составим таблицу для вычисления исходных данных.

Таблица 4

Вариационный ряд распределения содержания железа в сплошных медноколчеданных рудах Гая

	Интервалы, %	n_i	x_i	δ_i	$n_i\delta_i$	$n_i\delta_i^2$	$n_i\delta_i^3$	$n_i\delta_i^4$
I	38–40	6	39	–2	–I2	+24	–48	+96
2	40–42	I0	4I	–I	–I0	+I0	–I0	+I0
3	42–44	I5	43	0	0	0	0	0
4	44–46	I3	45	+I	+I3	+I3	+I3	+I3
5	46–48	6	47	+2	+I2	+24	+48	+96
	Сумма	50			+3	+7I	+3	+2I5

Выберем место нуля совпадающим с серединой центрального интервала $x_0 = 43$ и подсчитаем условие варианты δ_i. Проверка правильности вычисления исходных данных производится по формуле Шарлье:

$$\sum_{i=1}^{k} n_i(\delta_i+1)^4 = \sum_{i=1}^{k} n_i\delta_i^4 + 4\sum_{i=1}^{k} n_i\delta_i^3 + 6\sum_{i=1}^{k} n_i\delta_i^2 + 4\sum_{i=1}^{k} n_i\delta_i + \sum_{i=1}^{k} n_i \qquad (9)$$

При правильной подготовке данных формула Шарлье обращается в тождество. Вычисляем начальные моменты ряда в условных вариантах

$$m_1^{\delta} = \frac{\sum_{i=1}^{5} n_i\delta_i}{N} = \frac{+3}{50} = +0{,}06$$

$$m_2^{\delta} = \frac{\sum_{i=1}^{5} n_i\delta_i^2}{N} = \frac{+71}{50} = +1{,}42$$

$$m_3^{\delta} = \frac{\sum_{i=1}^{5} n_i\delta_i^3}{N} = \frac{+3}{50} = +0{,}06$$

$$m_4^{\delta} = \frac{\sum_{i=1}^{5} n_i\delta_i^4}{N} = \frac{+215}{50} = +4{,}3$$

Вычисляем среднее значение содержания железа $\bar{x}$, стандарт S и центральные моменты μ_3 и μ_4, используя формулы связи начальных моментов в условных вариантах m_p^{δ} с центральными моментами μ_p.

$$\bar{x} = m_1 = x_0 + \Delta x\, m_1^{\delta} = 43 + 2(+0{,}06) = 43{,}12\%\ Fe$$

$$S = \sqrt{\mu_2} = \Delta x\sqrt{m_2^{\delta} - (m_1^{\delta})^2} = 2\sqrt{1{,}42 - (0{,}06)^2} = 2{,}38\%\ Fe$$

$$\mu_3 = (\Delta x)^3\left[m_3^{\delta} - 3m_2^{\delta}m_1^{\delta} + 2(m_1^{\delta})^3\right] =$$

$$= 2^3\left[+0{,}06 - 3(+1{,}42)(+0{,}06) + 2(+0{,}06)^3\right] = -1{,}56$$

$$\mu_4 = (\Delta x)^4\left[m_4^{\delta} - 4m_3^{\delta}m_1^{\delta} + 6m_2^{\delta}(m_1^{\delta})^2 - 3(m_1^{\delta})^4\right] =$$

$$= 2^4\left[+4{,}3 - 4(+0{,}06)(+0{,}06) + 6(+1{,}42)(+0{,}06)^2 - 3(+0{,}06)^4\right] =$$

$$= 69{,}12$$

Определяем основные моменты и показатели асимметрии A и эксцесса $Э$.

$$A = \rho_3 = \frac{\mu_3}{S^3} = \frac{-1,56}{(2,38)^3} = -0,12$$

$$Э = \rho_4 - 3 = \frac{\mu_4}{S^4} - 3 = \frac{69,12}{(2,38)^4} - 3 = 2,15 - 3 = -0,85$$

Находим коэффициент вариации:

$$V = \frac{S}{\bar{x}} \cdot 100 = \frac{2,38}{43,12} \cdot 100 = 5,5\%$$

По формуле (2.I6) определяем модальное значение:

$$Mo = x_{Mo} + \Delta x \frac{\Delta_1}{\Delta_1 + \Delta_2} = 42 + \frac{2(15-10)}{(15-10)+(15-13)} =$$

$$= 43,43\ \%\ Fe$$

Для вычисления медианы составим таблицу накопленных частот исследуемого вариационного ряда:

Таблица 5

Интервалы вариационного ряда, %	38–40	40–42	42–44	44–46	46–48
Частоты, n_i	6	I0	I5	I3	6
Накопленные частоты, n_{si}	6	I6	3I	44	50

По формуле (I7) находим значение медианы:

$$Me = x_{Me} + \Delta x \frac{\left(\frac{N}{2} - n_{sMe}\right)}{n_{Me}} = 42 + \frac{2(25-16)}{15} = 43,2\ \%\ Fe$$

Таким образом вариационный ряд распределения содержания железа в сплошных медноколчеданных рудах Гайского месторождения меди практически симметричный, так как значение средней величины содержания, моды и медианы совпадают друг с другом в пределах погрешности ± I,0 % нейтронного активационного метода опробования, который использовался для определения содержания железа в рудах. О симметрии вариационного ряда свидетельствует также

небольшое значение показателя асимметрии A = -0,I2. Степень изменчивости содержания железа в сплошных медных колчеданах весьма равномерная, так как вычисленное значение коэффициента вариации V = 5,5% не превышает 6%. По значению показателя эксцесса Э = -0,84 вариационный ряд относится к плосковершинному.

2.2. Теоретические распределения

Результаты измерений физических свойств горных пород осложнены погрешностями наблюдений, поэтому они носят случайный характер и обладают свойствами случайной величины. Случайной величиной называется величина, которая в результате опыта может принять то или иное значение, заранее неизвестное.

Если перечислить все возможные значения случайной величины и указать вероятности этих значений, то получится распределение случайной величины. Характеристикой непрерывной случайной величины является плотность вероятности с которой распределяются её значения в окрестности данной точки $f(x)$. Плотность распределения вероятностей называют дифференциальной функцией распределения или дифференциальным законом распределения. Кривая, изображающая плотность распределения случайной величины, называется дифференциальной кривой распределения.

Вероятность того, что случайная величина x примет значение, лежащее в границах от α до β, равна определённому интегралу в тех же пределах от плотности вероятности

$$P(\alpha < x < \beta) = \int_{\alpha}^{\beta} f(x)\,dx$$

Геометрически эта вероятность выражается площадью криволинейной фигуры (рис.3).

Кроме дифференциальной функции распределения вероятностей часто используется кумулятивная функция распределения случайной величины, которая подсчитывается по формуле:

$$F(x) = \int_{-\infty}^{x} f(x)\,dx \qquad (\ I8\ )$$

Кумулятивная функция непрерывной случайной величины харак-

теризует вероятность того, что случайная величина X примет значение менее $X < x$.

Кумулятивная функция распределения называется также интегральной функцией или интегральным законом распределения. Она является универсальной характеристикой случайной величины. Кумулятивная функция монотонно возрастает в пределах $0 \le F(x) \le 1$. При $x \to -\infty$ она убывает до нуля, при $x \to +\infty$ стремится к единице (рис.3).

Аналогично статистическим характеристикам при описании случайных величин вводятся их числовые характеристики (математическое ожидание, дисперсия, среднее квадратическое отклонение, коэффициент вариации, показатель асимметрии и показатель эксцесса).

Математическое ожидание M_x непрерывной случайной величины определяется по формуле:

$$M_x = \int_{-\infty}^{+\infty} x f(x) dx \qquad (11)$$

По смыслу математическое ожидание является мерой положения и эквивалентно среднему значению вариационного ряда.

Дисперсия $D(x)$ непрерывной случайной величины характеризует степень рассеяния отдельных значений от математического ожидания случайной величины и подсчитывается по формуле:

$$D_x = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - M_x)^2 f(x) dx \qquad (12)$$

Среднее квадратичное отклонение σ_x и коэффициент вариации V_x являются мерами рассеяния случайной величины около её математического ожидания и определяются по формулам $\sigma_x = \sqrt{D_x}$ и $V_x = \sigma_x / M_x$. Мерами рассеяния случайной величины являются также показатель асимметрии A_x и показатель эксцесса Θ_x , которые по своему смыслу аналогичны показателям асимметрии и эксцесса вариационного ряда. Для непрерывной случайной величины:

$$A_x = \frac{1}{\sigma_x^3} \int_{-\infty}^{+\infty} (x - M_x)^3 f(x) dx \qquad (13)$$

$$\Theta_x = \frac{1}{\sigma_x^4} \int_{-\infty}^{+\infty} (x - M_x)^4 f(x) dx \qquad (14)$$

График дифференциальной и интегральной функции распределения непрерывной случайной величины

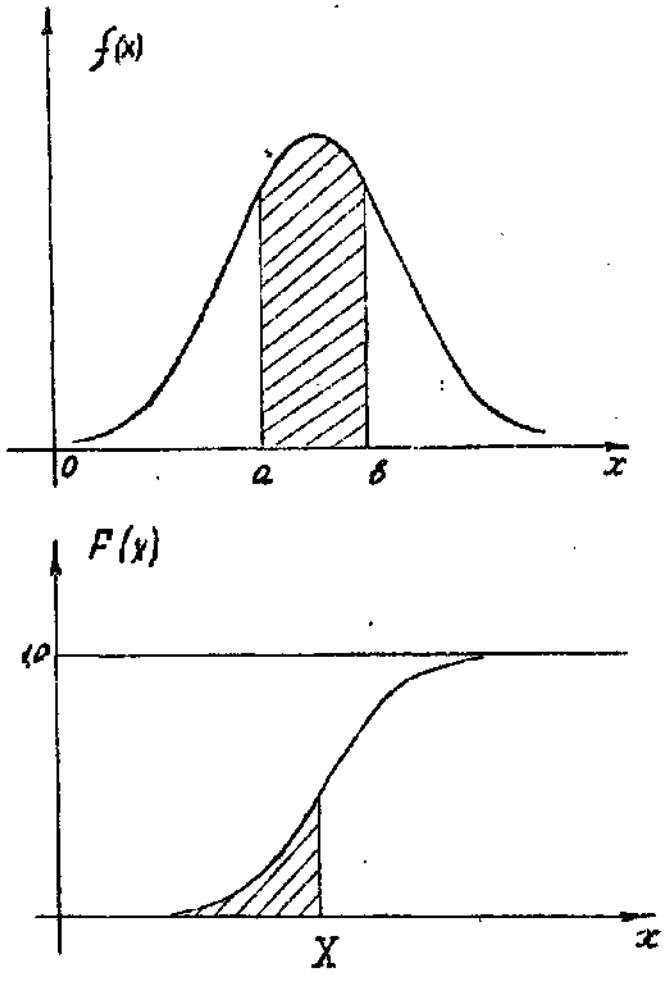


Рис. 3

Статистические характеристики вариационных рядов при достаточной статистике отсчетов стремятся, как к пределу, к числовым характеристикам случайных величин, распределение которых является предметом исследования теории вероятностей и носит закономерный характер.

Законы распределения случайной величины могут быть различными Для непрерывных случайных величин, к которым относятся физические свойства горных пород, чаще всего встречается нормальное (Гауссово) распределение и логарифмически нормальное распределение случайной величины.

Случайная величина x распределена нормально, если функция плотности вероятности $f(x)$ имеет вид

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-M_x)^2}{2\sigma_x^2}\right] \qquad (15)$$

где M_x - математическое ожидание, σ_x - среднее квадратическое отклонение (стандарт). Математическое ожидание соответствует среднему арифметическому отдельных измерений случайной величины:

$$M_x = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n} \qquad (16)$$

Стандарт подсчитывается по формуле:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - M_x)^2}{n}} \qquad (17)$$

Функция нормального распределения характеризуется двумя параметрами M_x и σ_x и имеет колоколообразную форму. При всех значениях x функция $f(x)$ принимает только положительные значения. Ветви кривой асимптотически приближаются к оси абсцисс $\lim_{x \to \pm\infty} f(x) = 0$. При $x = M_x$ нормальное распределение достигает максимума $f(x)_{max} = 1/\sigma_x \sqrt{2\pi}$. Ветви кривой симметричны относительно прямой $x = M_x$, так как $x - M_x$ содержится в формуле (15) в квадрате. Параметр M_x не оказывает влияния на форму кривой $f(x)$, но смещает её вдоль оси x. Параметр σ_x определяет вытянутость или сжатость кривой по оси x. Математическое ожидание величины x совпадает с модой и медианой $M_x = M_o = M_e$. Асимметрия и эксцесс нормального распределения равны нулю $A = Э = 0$ (Рис 4).

Внешний вид дифференциальной функции нормального распределения

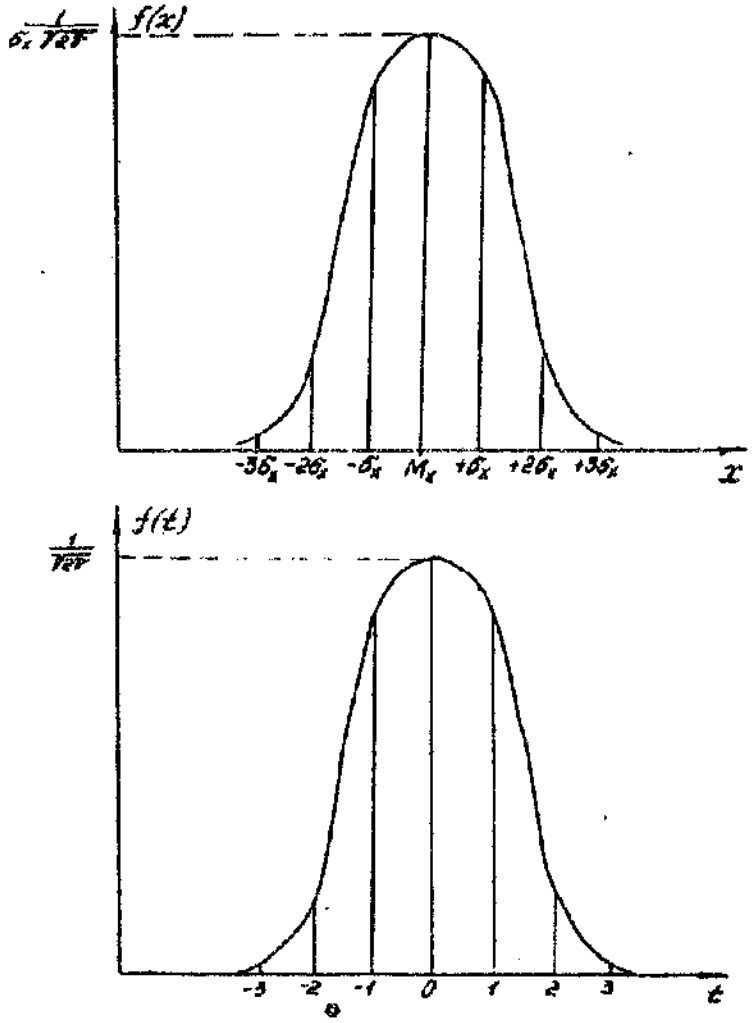


Рис. 4

Заменой переменных $t = \frac{x-M_x}{\sigma_x}$ любое нормальное распределение может быть приведено к простейшему виду

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} \qquad (18)$$

Такое преобразование переменной называется нормированием случайной величины к её среднему квадратическому отклонению. При этом начало отсчета переносится в точку M_x, а в качестве единицы масштаба используется среднее квадратическое отклонение σ_x. Функция нормированного нормального распределения зависит от одного параметра, аргумента $t = (x-M_x)/\sigma_x$. Кривая простейшего нормального распределения симметрична относительно оси ординат. При $t=0$ она имеет максимум равный $f(t)_{max} = 1/\sqrt{2\pi} \approx 0{,}4$. Площадь, ограниченная кривой $f(t)$ и осью t равна 0,683 в пределах от - 1 до + 1, 0,954 в пределах от - 2 до + 2, 0,997 в пределах от - 3 до + 3 и единице в пределах от $-\infty$ до $+\infty$ (рис. 4).

Кумулятивная функция нормального распределения имеет вид:

$$F(x) = \frac{1}{\sigma_x\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x} e^{-\frac{(x-M_x)^2}{2\sigma_x^2}} dx \qquad (19)$$

Нормированная кумулятивная функция нормального распределения подсчитывается по формуле

$$F(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{t} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \qquad (20)$$

функция табулирована / 1,2 /.

Непрерывная случайная величина x распределена логарифмически нормально, если логарифмы её значений распределены по закону Гаусса

$$f(y) = \frac{M}{\sigma_\lambda\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(y-M_y)^2}{2\sigma_\lambda^2}\right] \qquad (21)$$

где $y = \lg x$, M_y - математическое ожидание случайной величины y, σ_λ - среднее квадратическое отклонение $\lg x$ от его математического ожидания (логарифмический стандарт), M - переводной коэффициент от натуральных логарифмов к десятичным.

Математическое ожидание $\lg x$ соответствует среднему геометрическому самой случайной величины x.

$$\operatorname{antlg}(M_{\lg x}) = \tilde{x} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^{n} x_i} \qquad (22)$$

Логарифмический стандарт подсчитывается по формуле

$$\sigma_\lambda = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\lg x - M_{\lg x})^2}{n}} \qquad (23)$$

Кривая логарифмически нормального распределения имеет положительную (правостороннюю) асимметрию, причем $M_o < M_o < M_x$ тем сильнее, чем больше σ_λ. Эта кривая симметризуется с помощью логарифмического масштаба по оси абсцисс (рис. 5).

Кумулятивная функция логарифмически нормального распределения имеет вид

$$F(x) = \frac{1}{\sigma_\lambda\sqrt{2\pi}} \int_{0}^{\lg x} e^{-\frac{(\lg x - M_{\lg x})^2}{2\sigma_\lambda^2}} d\lg x \qquad (24)$$

2.3. Сопоставление эмпирических и теоретических распределений

Распределение физических параметров однородного геологического объекта чаще всего подчиняется нормальному закону (например, плотность горной породы) или логнормальному закону (магнитная восприимчивость, удельное электрическое сопротивление, концентрация химических элементов). Для правильной обработки результатов измерений необходимо знать какому закону соответствует распределение данного физического свойства. В соответствии с законом распределения при построении вариационных кривых интервал группирования физических свойств выбирается равным между собой в линейном масштабе при нормальном распределении. При построении полигонов и кумулят всегда показывают точки, по которым они строятся.

Для сравнения распределений графики накопления частостей удобно строить на вероятностном трафарете, который характеризуется вероятностной шкалой по оси ординат. На вероятностном трафарете нормальное распределение описывается прямой линией.

Сопоставление результатов эксперимента в виде гистограмм и графика накопления частостей с теоретическим нормальным распределением [illegible] рис. 6.

Кривые плотности вероятностей логарифмически нормального распределения

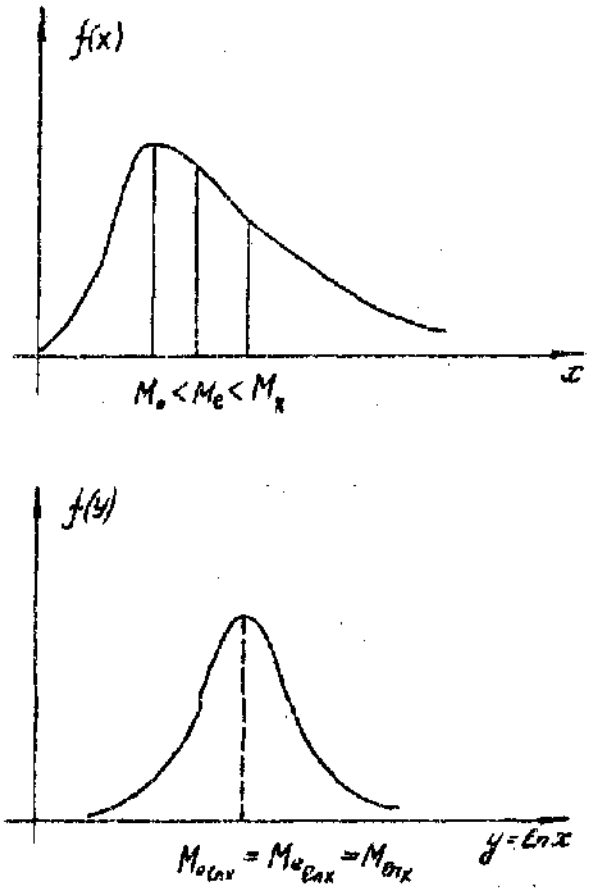


Рис. 5

Характер экспериментального (I) и теоретического нормального (2) распределений физического свойства X в виде гистограммы (а), графиков накопления частостей в обычном масштабе (б) и на вероятностном бланке (в)

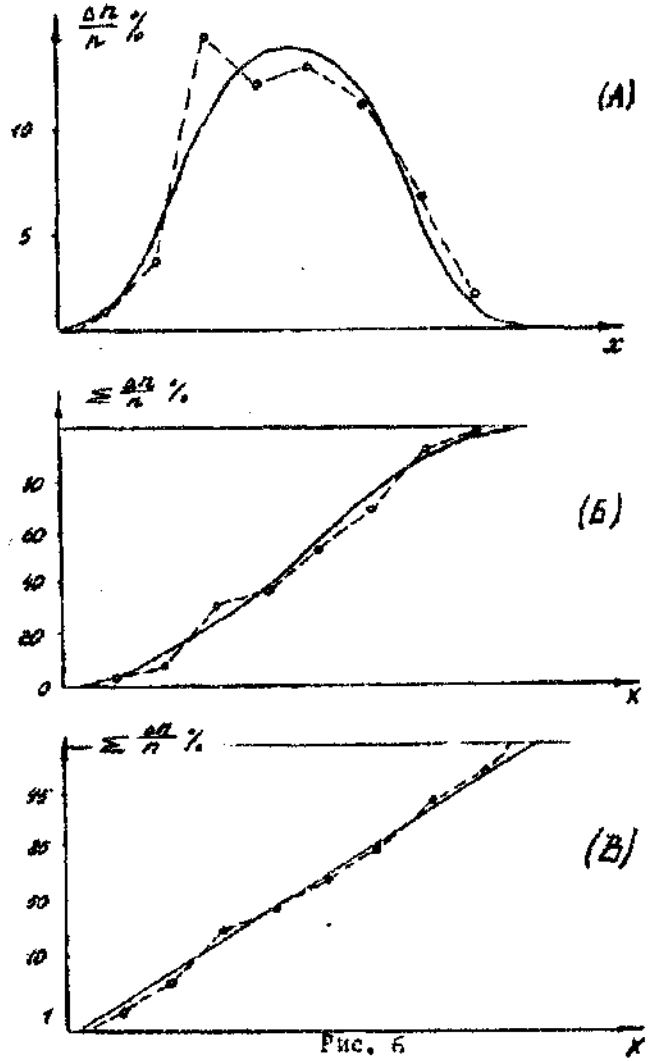


Рис. 6

Для проверки близости эмпирического и теоретического распределений используются критерии согласия χ^2 (хи - квадрат) Пирсона или λ А.Н.Колмогорова.

Критерий Пирсона основан на оценке статистической значимости расхождений эмпирических частот n_i вариационного ряда и частот n_i' соответствующего теоретического распределения, рис.6,а. Разности $n_i - n_i'$ возводятся в квадрат и делятся на n_i', откуда получают формулу критерия согласия χ^2

$$\chi_н^2 = \sum_{i=1}^{k} \frac{(n_i - n_i')^2}{n_i'} \qquad (25)$$

где $\chi_н^2$ - найденное значение критерия Пирсона, k - число интервалов вариационного ряда.

Критерий Пирсона зависит от числа степеней свободы f и уровня значимости α. Число степеней свободы определяют по формуле

$$f = k - c \qquad (26)$$

в которой c - количество наложенных связей при вычислении теоретических частот. Для нормального распределения количество наложенных связей равно двум, так как при расчете теоретических частот необходимо знать два параметра: математическое ожидание M_x и стандарт σ_x. Поэтому при оценке близости эмпирической кривой к нормальному распределению число степеней свободы определяется по формуле $f = k - 2$. Уровень значимости обычно задается в виде $\alpha = 0{,}05$ или $\alpha = 0{,}01$. Зная α и f определяют теоретическое значение $\chi_{\alpha,f}^2$ для чего используют специальные таблицы / I /.

Найденное значение $\chi_н^2$ сравнивают с табличным $\chi_{\alpha,f}^2$. Если $\chi_н^2 < \chi_{\alpha,f}^2$, то эмпирическое распределение не противоречит теоретическому, если $\chi_н^2 > \chi_{\alpha,f}^2$, то наблюдается статистически значимое различие между эмпирическим распределением и теоретическим. Если гипотеза о нормальном распределении не подтверждается, то необходимо провести проверку исходных данных и выявить причины приводящие к нарушению нормального распределения.

Для проведения вычисления составляется специальная таблица 6. В качестве примера рассмотрим вариационный ряд распределения

Таблица 6

Расчет исходных данных для определения критерия согласия $\chi_н^2$

№ п/п	Интервалы содержания, %	x_i	n_i	...	$\Delta i = x_i - \bar{x}$	$t = \frac{\Delta i}{\sigma}$	$\varphi(t)$	$n_i' = k\varphi(t)$	$n_i - n_i'$	$(n_i - n_i')^2$	$\frac{(n_i - n_i')^2}{n_i'}$
1	38–40	39	6	...	-4,12	1,73	0,0893	3,75	2,25	5,06	1,35
2	40–42	41	10	...	-2,12	0,89	0,2685	11,28	1,28	1,64	0,15
3	42–44	43	15	...	-0,12	0,05	0,3984	16,73	1,73	2,99	0,18
4	44–46	45	13	...	+1,88	0,80	0,2897	12,17	0,83	0,69	0,06
5	46–48	47	6	...	+3,88	1,63	0,1057	4,44	1,56	2,43	0,55
I	2	3	4	...	8	9	I0	II	I2	I3	I4
	Сумма		50								$\chi_н^2 = 2{,}29$

Примечание. $\bar{x} = 43{,}12$ гл , $S = 2{,}38$ гл , $k = \frac{N\Delta x}{S} = \frac{50\,2}{2{,}38} = 42$, $f = 5 - 2 = 3$

содержания железа в сплошных медноколчеданных рудах Гайского месторождения меди (таблица 4). Первые семь граф таблицы 6 совпадают с графами таблицы 4. Эти графы необходимы для нахождения среднего значения содержания железа $\bar{X}$ =43,12 % и стандарта S =2,38 %. Затем вычисляют для каждого интервала вариационного ряда отклонение Δ_i значений середины интервалов x_i от среднего значения $\bar{X}$ $\Delta_i = x_i - \bar{X}$ (графа 8). Подсчитывают нормированное отклонение $t = \frac{\Delta_i}{S}$, где S – стандарт вариационного ряда (графа 9). Подсчитывается нормированная плотность вероятности нормального распределения $\varphi(t)$ без учета знака t (графа I0). Значения функции $\varphi(t)$ приведены в таблице 8. Подсчитывается переходный коэффициент K от функции $\varphi(t)$ к теоретическим частотам нормального распределения по формуле

$$K = \frac{N \Delta X}{S} \qquad (27)$$

где N – объем выборки, ΔX – ширина интервала группирования, S – стандарт. Вычисляются теоретические частоты n_i' нормального распределения $n_i' = K \varphi(t)$ (графа II). Находятся отклонения эмпирических частот от теоретических $n_i - n_i'$ (графа I2), квадраты этих отклонений (графа I3) и частные от деления этих квадратов на n_i' (графа I4). Наблюдаемое значение критерия Пирсона находятся как сумма значений четырнадцатой графы.

Найденное значение критерия Пирсона $\chi^2_н$ сравнивается с теоретическим $\chi^2_{\alpha,f}$, приведенным в таблице 9. При уровне значимости α =0,05 и числе степеней свободы f =5–2=3 $\chi^2_{0,05;3}$ =7,82 > > 2,28 = χ^2 . Следовательно, вариационный ряд распределения содержания железа в рудах Гайского месторождения не противоречит нормальному закону. Вероятность случайного расхождения между теоретическим и статистическим распределением достаточно велика и можно считать правдоподобной гипотезу о нормальном распределении статистической совокупности.

Критерий согласия λ А.Н.Колмогорова основан на подсчете максимального значения модуля разности между графиком накопленных частот (кумулятой) вариационного ряда (рис.6) и теоретической функцией распределения

$$D = max |W - F(x)| \qquad (28)$$

W – кумулята вариационного ряда, $F(x)$ – нормированная кумулятивная функция нормального распределения (интеграл вероятности).

Значения кумулятивной функции нормального распределения подсчитываются по формуле

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{t} e^{-\frac{t^2}{2}} dx \qquad (29)$$

В таблице I0 приведены значения функции

$$F'(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{0}^{t} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \qquad (30)$$

Используя эту таблицу можно найти кумулятивную функцию нормального распределения по формулам

$$F(x) = 0,5 + F'(x)$$
$$F(-x) = 0,5 - F'(x) \qquad (31)$$

Критерий согласия А.Н.Колмогорова определяется соотношением $\lambda = D\sqrt{N}$, где N – число независимых наблюдений (объем выборки,) Найденное значение критерия $\lambda_н$ сравнивается с теоретическим при уровне значимости α =0,05 $\lambda_{0,05}$ =I,36. Если найденное значение $\lambda_н < \lambda_{0,05}$, то вариационный ряд не противоречит нормальному распределению. Если $\lambda_н > \lambda_{0,05}$, то вариационный ряд не согласуется с нормальным распределением.

Для проведения вычислений составляется таблица 7.

Максимальное значение модуля разности между кумулятой вариационного ряда и нормированной кумулятивной функцией распределения в рассматриваемом случае равно $D = max|W - F(t)|$ =0,025. При этом найденное значение критерия А.Н.Колмогорова равно $\lambda_н = D\sqrt{N}$ =0,025$\sqrt{50}$ = 0,I8. Поскольку найденное значение $\lambda_н$ меньше критического для 5 % - ного уровня значимости $\lambda_н < \lambda_{0,05}$ (I,36), то вариационный ряд распределения содержания железа в рудах Гайского месторождения не противоречит нормальному закону.

Способ построения кумулятивных кривых на вероятностном графарете рис.6.8 имеет ряд преимуществ перед методом построения

Таблица 7

Расчет исходных данных для определения критерия согласия λ

Номер п/п	Интервалы содержаний, % $a - b$	n_i	Частость $W_i = \frac{n_i}{N}$	Накопленная частость W	$t = \frac{b - \bar{x}}{S}$	$F(t)$	$\lvert W - F(t) \rvert$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	38–40	6	0,12	0,12	-1,31	0,095	0,025
2	40–42	10	0,20	0,32	-0,47	0,319	0,001
3	42–44	15	0,30	0,62	0,37	0,644	0,024
4	44–46	13	0,26	0,88	+1,21	0,089	0,007
5	46–48	6	0,12	1,00	+2,05	0,098	0,020
	Сумма	50					

Примечание. a и b – соответственно начало и конец i-го интервала,

$\bar{x} = 43,12\%\ Fe$, $S = 2,38\%\ Fe$ $N = 50$

вариационных кривых. Главными преимуществами являются: универсальность, пригодность для обработки нормального и логнормального распределений, простота аппроксимации семейства точек прямой линией, особенно в краевых частях распределения, возможность группировки в неравных интервалах группирования, возможность простой, но строгой оценки гипотезы нормальности (или логнормальности) с использованием критериев А.Н.Колмогорова.

ЗАДАНИЕ

по статистической обработке результатов измерения физических свойств горных пород.

I. Выполнить статистическую обработку результатов измерения физических свойств горных пород медноколчеданного месторождения Абей-Сай-Тау-Тау (Байгазский район ГазССР). Составить вариационные ряды значений электросопротивления и плотности кварцевых альбитофиров, которые приведены в таблице II. Построить графики, вычислить статистические характеристики, подсчитать критерии согласия эмпирических вариационных рядов и теоретических распределений

2. Выполнить статистическую обработку результатов измерения физических свойств горных пород. Для этого построить графики, вычислить статистические характеристики и подсчитать критерии согласия эмпирических вариационных рядов с нормальным распределением физических параметров.

Варианты заданий по статистической обработке.

Вариант I. Распределение плотности хромовой руды, г/см^3.

Вариант 2. Распределение плотности силикатной никелевой руды, г/см^3.

Вариант 3. Распределение влажности силикатной никелевой руды, %.

Таблица 8

Таблицы вариационных рядов

Вариант I		Вариант 2		Вариант 3	
классы	частоты	классы	частоты	классы	частоты
3,0–3,I	I	I–I,2	I	I0–20	I
3,I–3,2	2	I,2–I,4	2	20–30	8
3,2–3,3	7	I,4–I,6	3	30–40	29
3,3–3,4	II	I,6–I,8	8	40–50	23
3,4–3,5	I9	I,8–2,0	33	50–60	I0
3,5–3,6	I6	2,0–2,2	I4	60–70	3
3,6–3,7	8	2,2–2,4	I0	70–80	2
3,7–3,8	7	2,4–2,6	4		
3,8–3,9	2	2,6–2,8	I		
	Σ = 73		Σ = 76		Σ = 76

Таблица № 9

Таблица значений функции $\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}$

x	0	I	2	3	4	5	6	7	8
0,0	0,3989	3989	3989	3988	3986	3984	3982	3980	3977
0,I	3970	3965	3961	3956	3951	3945	3939	3932	3925
0,2	3910	3902	3894	3885	3876	3867	3857	3847	3836
0,3	3814	3802	3790	3778	3765	3752	3739	3726	3712
0,4	3683	3668	3653	3637	3621	3605	3589	3572	3555
0,5	3521	3503	3485	3467	3448	3429	3410	3391	3372
0,6	3332	3312	3292	3271	3251	3230	3209	3187	3166
0,7	3123	3101	3079	3056	3034	3011	2989	2966	2943
0,8	2897	2874	2850	2827	2803	2780	2756	2732	2709
0,9	2661	2637	2613	2589	2565	2541	2516	2492	2468
I,0	0,2420	2396	2371	2347	2323	2299	2275	2251	2227
I,I	2179	2155	2131	2107	2083	2059	2036	2012	1989
I,2	1942	1919	1895	1872	1849	1826	1804	1781	1758
I,3	1714	1691	1669	1647	1626	1604	1582	1561	1539
I,4	1497	1476	1456	1435	1415	1394	1374	1354	1334
I,5	1295	1276	1257	1238	1219	1200	1182	1163	1145
I,6	1109	1092	1074	1057	1040	1023	1006	0989	0973
I,7	0940	0925	0909	0893	0878	0863	0848	0833	0818
I,8	0790	0775	0761	0748	0734	0721	0707	0694	0681
I,9	0656	0644	0632	0620	0608	0596	0584	0573	0562
2,0	0,0540	0529	0519	0508	0498	0488	0478	0468	0459
2,I	0440	0431	0422	0413	0404	0396	0387	0379	0371
2,2	0355	0347	0339	0332	0325	0317	0310	0303	0297
2,3	0283	0277	0270	0264	0258	0252	0246	0241	0235
2,4	0224	0219	0213	0208	0203	0198	0194	0189	0184
2,5	0175	0171	0167	0163	0158	0154	0151	0147	0143
2,6	0136	0132	0129	0126	0122	0119	0116	0113	0110
2,7	0104	0101	0099	0096	0093	0091	0088	0086	0084
2,8	0079	0077	0075	0073	0071	0069	0067	0065	0063
2,9	0060	0058	0056	0055	0053	0051	0050	0048	0047
3,0	0,0044	0043	0042	0040	0039	0038	0037	0035	0034
3,I	0033	0032	0031	0030	0029	0028	0027	0026	0025
3,2	0024	0023	0022	0022	0021	0020	0020	0019	0018
3,3	0017	0017	0016	0016	0015	0015	0014	0014	0013
3,4	0012	0012	0012	0011	0011	0010	0010	0010	0009
3,5	0009	0008	0008	0008	0008	0007	0007	0007	0007
3,6	0006	0006	0006	0006	0005	0005	0005	0005	0005
3,7	0004	0004	0004	0004	0004	0004	0004	0003	0003
3,8	0003	0003	0003	0003	0003	0003	0002	0002	0002
3,9	0002	0002	0002	0002	0002	0002	0002	0002	0001

Таблица 10

Значения статистики Хи -квадрат ($\chi^2_{\alpha,f}$)

f	χ^2	f	χ^2	f	χ^2
		Уровень значимости α = 0,05			
I	3,84	II	I9,67	2I	32,67
2	5,99	I2	2I,03	22	33,92
3	7,82	I3	22,36	23	35,I7
4	9,49	I4	23,68	24	36,4I
5	II,07	I5	25,00	25	37,65
6	I2,59	I6	26,30	26	38,88
7	I4,07	I7	27,59	27	40,II
8	I5,5I	I8	28,87	28	4I,34
9	I6,92	I9	30,I4	29	42,56
I0	I8,3I	20	3I,4I	30	43,77
		Уровень значимости α = 0,0I			
I	6,63	II	24,73	2I	38,93
2	9,2I	I2	26,22	22	40,29
3	II,34	I3	27,69	23	4I,64
4	I3,28	I4	29,I4	24	42,96
5	I5,09	I5	30,58	25	44,3I
6	I6,8I	I6	32,00	26	45,64
7	I8,48	I7	33,4I	27	48,96
8	20,09	I8	34,80	28	48,28
9	2I,67	I9	36,I9	29	49,59
I0	23,2I	20	37,57	30	50,89

Таблица №II.2

Таблица значений функции $F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{z^2}{2}} dz$

x	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0,0	0,00000	00399	00798	0II97	01595	01994	02392	02790	03I88
0,I	03983	04380	04776	05I72	05567	05962	06356	06749	07142
0,2	07926	08317	08706	09095	09483	0987I	I0257	I0642	I1026
0,3	II79I	I2I72	I2552	I2930	I3307	I3683	I4058	I443I	I4803
0,4	I5542	I59I0	I6276	I6640	I7003	I7364	I7724	I8082	I8439
0,5	I9I46	I9497	I9847	20I94	20540	20884	2I226	2I566	2I904
0,6	22575	22907	23237	23565	2389I	24215	24537	24857	25175
0,7	25804	26II5	26424	26730	27035	27337	27637	27935	28230
0,8	288I4	29I03	29389	29673	29955	30234	305II	307[illegible]	3I327
0,9	3I594	3I859	32I2I	3238I	32639	32894	33I47	33398	33646
I,0	34I34	34375	346I4	34850	35083	353I4	35543	35769	35993
I,I	36433	36650	36864	37076	37286	37493	37698	37900	38I00
I,2	38493	38686	38877	39065	3925I	39435	396I7	397[illegible]	39973
I,3	40320	40490	40658	40824	40988	4II49	4I309	4I466	4162I
I,4	4I924	42073	42220	42364	42507	42647	42786	42922	43056
I,5	433I9	43448	43574	43699	43822	42943	43062	44I79	44295
I,6	44520	44630	44738	44845	44950	45052	45I54	45I54	45352
I,7	45543	45637	45728	458I8	45907	45994	46080	46I64	46246
I,8	46407	46485	46562	46638	467I2	46784	46856	46926	46995
I,9	47I28	47I93	47257	47320	4738I	4744I	47500	47558	476I5
2,0	47725	47778	4783I	47882	47932	47982	48030	48077	48I24
2,I	482I4	48257	48300	4834I	48382	48422	4846I	485[illegible]	485[illegible]
2,2	486I0	48645	48679	487I3	48745	48778	48809	48840	4887[illegible]
2,3	48928	48956	48983	49010	49036	4906I	49086	49III	49I34
2,4	49I80	49202	49224	49245	49266	49286	49306	4[illegible]24	49343
2,5	49379	49396	494I3	49430	4944[illegible]	4946I	49477	49492	495[illegible]
2,6	49534	49547	49560	49573	49585	49598	49609	496[illegible]	49632
2,7	49653	49664	49674	49683	49693	49702	497II	49720	49729
2,8	49744	49752	49760	49767	49774	4978I	49788	49795	498[illegible]
2,9	498I3	498I9	49825	4983I	49836	4984I	43846	49[illegible]I	49[illegible]
3,0	0,49865		3,I	49903	3,2	4993I	3,3	49952	3,4
3,5	49977		3,6	49984	3,7	49989	3,8	49[illegible]	3,9
4,0	499968								
4,5	499997								
5,0	49999997								

Таблица 12

Физические свойства кварцевых альбитофиров месторождения Абай-Сай-Тау-Тау

Номер	ρ (Ом·м)	σ (т/см³)	Номер	ρ (Ом·м)	σ (т/см³)
I	920	2,67	3I	II00	2,74
2	970	2,69	32	I300	2,75
3	I200	2,63	33	700	2,73
4	I300	2,65	34	660	2,8I
5	4200	2,6I	35	II00	2,64
6	3700	2,64	36	I500	2,72
7	2200	2,7I	37	8I0	2,80
8	3500	2,7I	38	I300	2,94
9	5700	2,68	39	740	2,77
I0	5800	2,69	40	920	2,90
II	6000	2,68	4I	560	2,75
I2	4800	2,7I	42	940	2,75
I3	3900	2,73	43	990	2,74
I4	7600	2,7I	44	I300	2,74
I5	3900	2,58	45	450	2,59
I6	840	2,72	46	2400	2,68
I7	420	2,65	47	5800	2,67
I8	660	2,74	48	I600	2,73
I9	3000	2,95	49	5400	2,77
20	800	2,75	50	3200	2,68
2I	I000	2,75	5I	420	2,97
22	870	2,8I	52	I600	2,89
23	I200	2,74	53	I600	2,83
24	I400	2,75	54	I500	2,7I
25	750	2,9I	55	400	2,72
26	2500	2,75	56	370	2,75
27	I900	2,74	57	2000	2,68
28	I000	2,75	58	480	2,73
29	I200	2,74	59	690	2,76
30	I800	2,75	60	2000	2,68

Номер	ρ (Ом·м)	σ (т/см³)	Номер	ρ (Ом·м)	σ (т/см³)
6I	I300	2,77	9I	350	2,9I
62	I500	2,64	92	460	2,9I
63	2500	2,78	93	I90	2,77
64	9600	2,72	94	300	2,60
65	680	2,73	95	640	2,90
66	5000	2,80	96	I60	2,74
67	500	2,75	97	880	2,70
68	I500	2,75	98	I200	2,70
69	890	2,76	99	II00	2,73
70	I000	2,70	I00	I500	2,73
7I	3500	2,72	I0I	750	2,70
72	2900	2,73	I02	6I0	2,73
73	7700	2,58	I03	900	2,73
74	II00	2,60	I04	II00	2,74
75	I200	2,74	I05	8500	2,72
76	5700	2,70	I06	I0900	2,70
77	580	2,86	I07	I0900	2,90
78	230	2,75	I08	I2000	2,69
79	240	2,70	I09	2000	2,97
80	200	2,87	II0	4I00	2,96
8I	200	2,84	III	8700	2,63
82	350	2,73	II2	I2000	2,68
83	II00	2,82	II3	I0000	2,67
84	220	2,73	II4	8200	2,69
85	220	2,70	II5	9000	2,66
86	9I	2,7I	II6	9600	2,65
87	I80	2,80	II7	2200	2,72
88	390	2,66	II8	9300	2,68
89	400	2,87	II9	4200	2,70
90	I7	3,85	I20	7700	2,7I

Номер	ρ (Ом м)	σ (г/см^3)	Номер	ρ (Ом м)	σ (г/см^3)
I2I	3700	2,67	I5I	6I0	2,60
I22	4400	2,66	I52	360	2,90
I23	6I00	2,7I	I53	940	2,82
I24	9300	2,65	I54	660	2,84
I25	I400	2,73	I55	900	2,75
I26	6400	2,67	I56	I000	2,83
I27	2I0	2,68	I57	930	2,93
I28	260	2,76	I58	I50	2,89
I29	220	2,83	I59	470	2,8I
I30	460	2,8I	I60	630	2,84
I3I	360	2,85	I6I	770	2,82
I32	270	2,8I	I62	690	2,79
I33	490	2,76	I63	300	2,83
I34	370	2,77	I64	63	2,86
I35	420	2,82	I65	290	2,85
I36	I70	2,72	I66	3I0	2,84
I37	400	2,78	I67	380	2,80
I38	240	2,80	I68	5200	2,8I
I39	2I0	2,8I	I69	5500	2,80
I40	450	2,79	I70	3300	2,8I
I4I	3I0	2,84	I7I	7I00	2,69
I42	260	2,83	I72	4400	2,79
I43	260	2,8I	I73	4800	2,7I
I44	440	2,87	I74	4000	2,8I
I45	400	2,86	I75	59	2,75
I46	270	2,84	I76	4I	2,77
I47	980	2,83	I77	I93	2,90
I48	820	2,83	I78	220	2,70
I49	630	2,86	I80	3I6	2,7I
I50	720	2,83	I8I	336	2,79
			I82	270	2,77
			I83	340	2,72

3. Работа № 3. ОЦЕНКА ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАТИВНОСТИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

При картировании горных пород геологическая эффективность геофизических методов может быть оценена по их информативности. Расчет информативности основан на оценке среднего количества информации о системе горных пород Y, содержащейся в сообщении о состоянии системы значений физического поля X. Для численных расчетов необходимо ознакомиться с некоторыми понятиями теории информации.

3.1. Теоретические предпосылки

Из курса теории информации известно понятие физической системы /1/. Для геофизиков-разведчиков физической системой может быть система значений физического поля, набор геологических объектов, система типов горных пород и т.д.

Пусть X физическая система, которая случайным образом может оказаться в том или ином состоянии, т.е. системе X присуща какая-то степень неопределенности. Меру неопределенности состояния физической системы будем называть энтропией. Сведения тем целее и содержательнее, чем больше была неопределенность системы X априори до их получения.

Степень неопределенности состояния системы определяется числом ее возможных состояний и вероятностью этих состояний. Например, монета может оказаться в одном из двух состояний "герб" или "решка". Кубик имеет шесть возможных состояний. Степень неопределенности состояний кубика больше, чем монеты. Априорные вероятности состояний монеты равны 0,5. Двигатель внутреннего сгорания тоже может оказаться в одном из двух состояний рабочем или нерабочем. Однако вероятность запущенного двигателя оказаться в рабочем состоянии равна 0,99. Степень неопределенности такой системы значительно меньше, чем у монеты. Таким образом, для описания неопределенности состояния системы необходимо знать количество возможных состояний и их вероятности.

В общем случае система X принимает состояния $x_1, x_2, x_3, x_4, \dots x_n$ с вероятностями $p_1, p_2, p_3 \dots p_n$, где $p_i = P(X \sim x_i)$ - вероятность того, что система X примет состояние x_i. Символом $X \sim x_i$ будем обозначать событие, состоящее в том, что система X находится в состоянии x_i. При этом все состояния образуют полную группу попарно несовместных событий, которые в сумме дают достоверное событие $\sum_{i=1}^{n} p_i = 1$.

Запишем данные о состоянии системы X в виде таблицы:

x_i	x_1	x_2	x_3	...	x_n
p_i	p_1	p_2	p_3	...	p_n

В верхней строке таблицы записаны возможные состояния системы, а в нижней строке вероятности возможных состояний. Эта таблица сходна с рядом распределения прерывной случайной величины X с возможными значениями $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$, имеющими вероятности $p_1, p_2, p_3 \dots p_n$. Для того, чтобы свести состояния физической системы к случайной величине X, достаточно приписать каждому состоянию какое-то числовое значение, например, его номер.

Мерой априорной неопределенности состояния системы является энтропия. Энтропией системы называется сумма произведений вероятностей различных состояний системы на логарифмы этих вероятностей, взятая с обратным знаком

$$H(X) = -\sum_{i=1}^{n} p_i \log_a p_i \qquad (3.1)$$

Знак минус перед суммой поставлен для того, чтобы энтропия была положительной, т.к. $p_i < 1$ и $\log p_i < 0$. Основание логарифма может быть любым $a > 1$. Перемена основания равносильна умножению энтропии на постоянное число, а выбор основания равносилен выбору единицы измерения энтропии. Например, при $a = 10$ единицы называются десятичными, при $a = 2$ единицы называются двоичными.

Двоичные единицы хорошо совпадают с двоичной системой счисления ЭВМ. При выборе основания логарифма $a = 2$ за единицу измерения энтропии принимается энтропия физической системы X, которая имеет два равновозможных состояния, например, энтропия монеты, ячейки памяти на ферритах или энтропия одного разряда двоичного числа, которое может принимать значения 0 или 1.

Систему с двумя равновозможными состояниями можно представить в виде:

x_i	x_1	x_2
p_i	0,5	0,5

Энтропия такой системы равна единице, которая называется двоичной единицей энтропии

$$H(X) = -\left(\frac{1}{2}\log_2\frac{1}{2} + \frac{1}{2}\log_2\frac{1}{2}\right) = 1$$

Двоичная единица энтропии называется битом, от слова *bit* (сокращение от *binary digit* - двоичный знак). Это энтропия одного разряда двоичного числа.

В качестве примера подсчитаем в двоичных единицах энтропию системы X, имеющую n равновозможных состояний:

X_i	x_1	x_2	...	x_n
p_i	$\frac{1}{n}$	$\frac{1}{n}$	...	$\frac{1}{n}$

По формуле (3.1)

$$H(X) = -n\frac{1}{n}\log_2\frac{1}{n} = -\log_2 1 + \log_2 n = \log_2 n \quad (3.2)$$

т.е. энтропия такой системы равна двоичному логарифму числа состояний.

Энтропия физической системы, подсчитанная по формуле (3.1), удовлетворяет трем основным свойствам:

- она обращается в нуль, когда одно из состояний системы достоверно, а другие состояния невозможны;
- при заданном числе состояний n, она обращается в максимум, когда состояния равновероятны;
- обладает свойством аддитивности, т.е. при объединении независимых систем их энтропии складываются.

Таким образом, подсчет энтропии по формуле (3.1) правильно характеризует степень неопределенности физического состояния системы, что и обусловило выбор формулы (3.1) для количественных подсчетов энтропии.

Для подсчета энтропии удобно использовать функцию:

$$\eta(p) = -p\log_2 p,$$

значения которой табулированы от нуля до единицы через 0,01 и приведены в приложении (таблица 3.1). Используя функцию $\eta(p)$, выражение (3.1) можно переписать в виде

$$H(X) = \sum_{i=1}^{n}\eta(p_i) \quad (3.3)$$

Рассмотрим примеры количественных подсчетов энтропии геофизических систем.

Пример 1. Определить энтропию системы, состоящей из двух методов магниторазведки и гравиразведки, привлеченных в помощь геологическому картированию участка работ. В результате съемки система геофизических измерений X может оказаться в одном из четырех возможных состояний: $X \sim x_1$ - оба измерения высокие, $X \sim x_2$ - магниторазведка представлена высокими значениями, а гравиразведка низкими, $X \sim x_3$ - магниторазведка представлена низкими значениями, а гравиразведка высокими, $X \sim x_4$ - оба измерения низкие. Вероятности этих состояний, соответственно равны 0,2, 0,3, 0,4, 0,1.

Решение. Запишем условие задачи в виде таблицы состояний

X_i	x_1	x_2	x_3	x_4
P_i	0,2	0,3	0,4	0,1

По формуле (3) находим:

$$H(X) = \sum_{i=1}^{n}\eta(p_i) = \eta(0,2) + \eta(0,3) + \eta(0,4) + \eta(0,1)$$

Используя таблицу (3.1) получаем

$$H(X) = 0,4644 + 0,5211 + 0,5288 + 0,3322 = 1,85\ bit$$

Пример 2. Определить максимальную возможную энтропию системы из трех геофизических методов (магниторазведка, гравиразведка и электроразведка), каждый из которых может быть в четырех возможных состояниях.

Решение. Общее число возможных состояний равно $n = 4 \cdot 4 \cdot 4 = 64$. Максимальная возможная энтропия системы будет в том случае, когда все состояния системы равновероятны. При этом по формуле (3.2) находим $H(X) = \log_2 64 = 6\ bit$.

Под объединением двух систем X и Y с возможными состояниями $x_1, x_2 \ldots x_n$ и $y_1, y_2 \ldots y_m$ понимается сложная система (X, Y), состояния которой (x_i, y_j) представляет собой набор всех возможных состояний x_i и y_j. Число таких комбинаций будет $n \cdot m$.

Обозначим $P_{ij} = P(X \sim x_i, Y \sim y_j)$ вероятность того, что система (X, Y) будет в состоянии (x_i, y_j). Вероятности P_{ij} можно представить в виде таблицы.

y_j	x_i			
	x_1	x_2	...	x_n
y_1	p_{11}	p_{21}	...	p_{n1}
y_2	p_{12}	p_{22}	...	p_{n2}
⋮	...	...	...	...
y_m	p_{1m}	p_{2m}	...	p_{nm}

Энтропия сложной системы по определению равна

$$H(X,Y) = -\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} p_{ij} \log p_{ij} \qquad (3.4)$$

Если X и Y независимы, то при объединении систем их энтропии складываются

$$H(X,Y) = H(X) + H(Y) \qquad (3.5)$$

Если объединяются зависимые системы, то энтропия объединения меньше энтропий составных частей.

Обозначим $P(y_j/x_i)$ условную вероятность того, что система Y примет состояние y_j при условии, что система X находится в состоянии x_i

$$P(y_j/x_i) = P(Y \sim y_j / X \sim x_i)$$

Условную энтропию системы Y при условии, что система X находится в состоянии x_i, обозначим $H(Y/x_i)$.

По определению

$$H(Y/x_i) = -\sum_{j=1}^{m} P(y_j/x_i) \log P(y_j/x_i) \qquad (3.6)$$

Условная энтропия системы Y зависит от того, какое состояние x_i приняла система X. Таких состояний n. Вероятность этих состояний известна. Система Y может принимать разные состояния с вероятностью p_i.

Полную (среднюю) энтропию системы Y обозначим $H(Y/X)$. По определению среднего

$$H(Y/X) = \sum_{i=1}^{n} p_i H(Y/x_i) = -\sum_{i=1}^{n} p_i \sum_{j=1}^{m} P(y_j/x_i) \log P(y_j/x_i) \qquad (3.7)$$

Условная энтропия $H(Y/X)$ характеризует степень неопределенности системы Y, оставшуюся после того, как состояние системы X полностью определилось. Это полная условная энтропия системы Y. Порядок выполнения расчетов по формуле (3.7) проиллюстрируем на примере.

Пример. Имеются две системы Y и X, объединенные в одну (X, Y), где Y – система типов горных пород, X – система интервалов значений физического поля.

Каротажные диаграммы измерений радиоактивности и электрического поля исследуемых типов горных пород приведены на рис. 3.1. Горные породы сложены глинами y_1, песчаниками y_2 и известняками y_3. По скважине выполняется каротаж ГК (гамма-каротаж), ПС (каротаж потенциалов собственной поляризации горных пород), КС (каротаж кажущегося сопротивления) и НГК (нейтронный гамма-каротаж).

Требуется оценить степень неопределенности состояния системы горных пород Y, оставшуюся после того, как состояние системы интервалов значений физического поля X полностью определилось, т.е. все измерения выполнены.

Для определенности в качестве системы X выберем интервалы значений радиоактивного поля. Глины имеют повышенное значение радиоактивности 20–30 мкР/ч и выше, песчаники средние значения 10–20 мкР/ч, известняки имеют низкую радиоактивность 0–10 мкР/ч. Учитывая сказанное, интервалы значений естественной радиоактивности горных пород выберем следующим образом: x_1 в пределах 20–30 мкР/ч и выше, x_2 в пределах 10–20 мкР/ч, x_3 в пределах 0–10 мкР/ч.

Решение. Подсчитаем вероятности состояний $P_{ij} = P(X \sim x_i, Y \sim y_j)$ объединенной системы (X, Y). Для этого воспользуемся геометрической трактовкой понятия вероятности. Геометрическая вероятность обобщает классическое определение вероятности, как частоты появления события при многократном воспроизведении эксперимента, на бесконечное множество исходов эксперимента.

К понятию геометрической вероятности приводит задача о бросании точки в некоторую ограниченную область G, содержащую

в себе меньшую по размерам область g. Если событие A состоит в попадании точки в область g, то $P(A) = mes\, g / mes\, G$, где $mes\, g$ и $mes\, G$ – меры областей g и G. Это могут быть отрезки длин, площади, объемы. В нашем случае это отрезки длин по оси скважины.

С учетом сказанного, вероятность встречи горной породы j-го типа y_j равна:

$$P(y_j) = L(y_j)/L, \qquad (3.8)$$

вероятность наблюдения гамма-поля в i-том интервале значений x_i равна

$$P(x_i) = L(x_i)/L \qquad (3.9)$$

вероятность одновременной встречи горной породы j-го типа и наблюдения гамма-поля в i-ом интервале значений x_i равна

$$P(y_j, x_i) = L(y_j, x_i)/L \qquad (3.10)$$

где $L(y_j)$ – суммарный интервал встречи скважины с породой j-го типа, $L(x_i)$ – суммарный интервал наблюдения гамма-поля в интервале значений x_i, L – полная длина профиля наблюдений.

Составим таблицу P_{ij} вероятностей состояния системы (X, Y)

y_j		x_i			
		$X \sim x_i$			$P_j = P(Y \sim y_j)$
		x_1 (0-10)	x_2 (10-20)	x_3 (20-30)	
$Y \sim y_j$	y_1 (глина)	0	0,02	0,43	0,45
	y_2 (песчаник)	0	P_{ij}=0,39	0,03	0,42
	y_3 (известняк)	0,12	0,01	0	0,13
$P_i = P(X \sim x_i)$		0,12	0,42	0,46	1,0

По теории умножения вероятностей

$$p_i\, P(y_j/x_i) = P_{ij} \qquad (3.11)$$

откуда следует, что условные вероятности того, что система типов горных пород Y примет состояние y_j при условии, что система интервалов радиоактивного поля X находится в состоянии x_i, будут равны

$$P(y_j/x_i) = P_{ij}/p_i \qquad (3.12)$$

Поделив каждое значение таблицы P_{ij} на вероятности появления интервалов значений радиоактивного поля p_i, получим таблицу условных вероятностей $P(y_j/x_i)$, которая имеет вид:

y_j		x_i			
		$X \sim x_i$			
		x_1 (0-10)	x_2 (10-20)	x_3 (20-30)	
$Y \sim y_j$	y_1 (глина)	0	0,05	0,94	
	y_2 (песчаник)	0	$P(y_j/x_i)$=0,93	0,06	
	y_3 (известняк)	1	0,02	0	
$P_i = P(X \sim x_i)$		0,12	0,42	0,46	

Подсчитаем условную энтропию системы типов горных пород Y, остающуюся после того, как состояние системы интервалов значений радиоактивного поля X полностью определилось. Для этого используем формулу полной условной энтропии (3.7):

$$H(Y/X) = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} p_i\, \eta\left[P(y_j/x_i)\right] \qquad (3.13)$$

где $\eta(p) = -p \log_2 p$ – табулированная функция, приведенная в таблице 3.1 .

Воспользовшись таблицей 3.1 , находим:

$$H(Y/X) = 0{,}12\left[\eta(0) + \eta(0) + \eta(1)\right] + 0{,}42\left[\eta(0{,}05) + \eta(0{,}93) + \right.$$

$$\left. + \eta(0{,}02)\right] + 0{,}46\left[\eta(0{,}94) + \eta(0{,}06) + \eta(0)\right] = 0{,}42\left[0{,}2161 + \right.$$

$$\left. + 0{,}0974 + 0{,}1128\right] + 0{,}46\left[0{,}0839 + 0{,}2435\right] = 0{,}328 \ bit$$

Таким образом, неопределенность системы Y , оставшаяся после того, как состояние системы X полностью определилось, характеризуется энтропией 0,328 bit .

Установим связь между энтропией и информацией. Любые сведения (информация) уменьшают неопределенность системы (энтропию). Поэтому, естественно, количество информации измерять уменьшением энтропии.

Если до получения информации (априори) энтропия была $H(X)$, а после получения сведений состояние системы полностью определилось, т.е. энтропия стала равной нулю, то

$$J_X = H(X) - 0 = H(X) \qquad (3.14)$$

где J_X – информация о системе X .

Таким образом, количество информации, приобретаемое при полном выяснении состояния системы равно энтропии этой системы

$$J_X = -\sum_{i=1}^{n} p_i \log p_i \qquad (3.15)$$

где $p_i = P(X \sim x_i)$ – вероятность того, что система находится в состоянии x_i .

Естественно, каждое слагаемое выражения (3.15) рассматривать как частную информацию J_{x_i} отдельного сообщения о том, что система X находится в состоянии x_i

$$J_{x_i} = -\log p_i \qquad (3.16)$$

Тогда J_X будет средней (полной) информацией, получаемой от всех возможных отдельных сообщений с учетом их вероятностей. Если все возможные состояния априори равновероятны $p_1 = p_2 = \dots p_n = \frac{1}{n}$, то частная информация от отдельного сообщения $J_{x_i} = -\log p_i = \log n$ равна средней информации $J_X = -n \frac{1}{n} \log \frac{1}{n} = \log n$.

Измеряя информацию в двоичных единицах, мы характеризуем ее числом ответов "да" или "нет".

Действительно, для того чтобы выяснить состояние системы X , которая может оказаться в одном из двух состояний

x_i	x_1	x_2
p_i	p_1	p_2

Надо задать вопрос. Находится ли система X в состоянии x_1 ? Ответ "да" или "нет" доставляет информацию, которая достигает своего максимального значения $J_X = 1$, когда оба состояния априори равновероятны $p_1 = p_2 = \frac{1}{2}$ например, состояние системы "монета" . Таким образом, максимальная информация, даваемая ответом "да" или "нет", равна одной двоичной единице. Если информация равна n bit , то она равносильна информации, даваемой n ответами "да" или "нет" на вопросы, поставленные таким образом, что ответы "да" или "нет" одинаково вероятны.

Информация равна разности энтропий до и после получения сообщения о результатах измерений физического поля. Подсчитаем информацию, которую доставляют результаты измерений физического поля при определении типов исследуемых горных пород на участке работ. Такой подсчет позволяет оценить геологическую информативность используемого геофизического метода или комплекса методов.

Сформулируем задачу следующим образом. Получены сведения о результатах наблюдений физического поля X , которое связано с системой типов горных пород на участке работ Y . Какую информацию о системе Y дает наблюдение системы X ?

Определим среднюю (полную) информацию о системе Y , содержащейся в системе X , как уменьшение энтропии системы Y в результате получения сведений о X

$$J_{X \to Y} = H(Y) - H(Y/X) \qquad (3.17)$$

где $H(y)$ – априорная энтропия системы y, $H(y/x)$ – апостериорная (остаточная) энтропия системы y, остающаяся после получения сведений о системе x.

Заметим, что $J_{x \to y} = J_{y \to x}$. Из двух систем каждая содержит относительно другой одну и ту же информацию, т.е. $H(x) - H(x/y) = H(y) - H(y/x)$.

Пример. Найти информацию о системе типов горных пород y, которая содержится в результатах измерений их естественной радиоактивности x.

Решение. Полная (средняя) информация о системе y, содержащаяся в системе x, подсчитывается по формуле (3.17). Энтропия системы y априори равна:

$$H(y) = \sum_{i=1}^{n} \eta[p(y_i)]$$

где $\eta(p) = -p \log_2 p$ – табулированная функция, приведенная в таблице 3.1. Априорные геометрические вероятности состояний системы y равны: для глин $p_1 = 0{,}45$, для песчаников $p_2 = 0{,}42$, для известняков $p_3 = 0{,}13$.

Воспользовавшись таблицей 3.1 находим априорную энтропию системы y

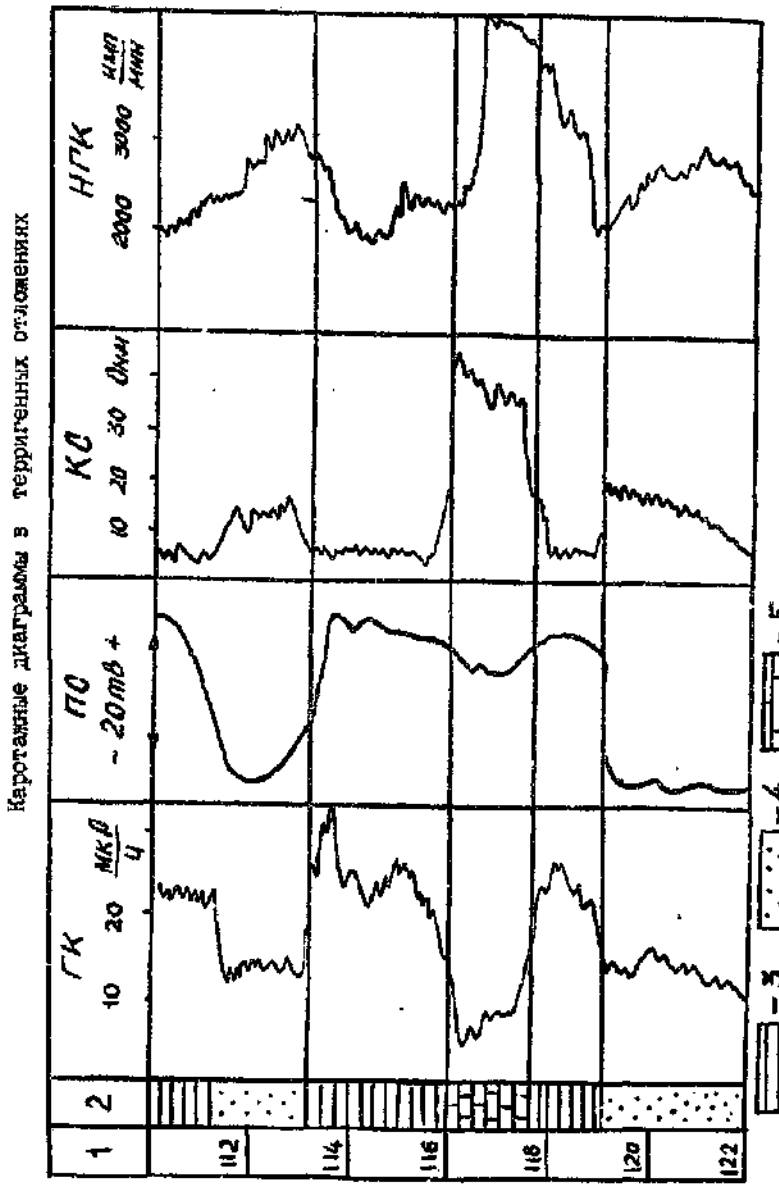
$$H(y) = \eta(0{,}45) + \eta(0{,}42) + \eta(0{,}13) = 0{,}5184 + 0{,}5256 + 0{,}3826 = 1{,}4266 \text{ бит}$$

Апостериорная энтропия системы y, оставшаяся после выполнения измерений естественной радиоактивности горных пород, подсчитана ранее и равна $H(y/x) = 0{,}328$ бит.

Таким образом, информация о системе y, содержащаяся в системе x, равна

$$J_{x \to y} = 1{,}4266 - 0{,}328 = 1{,}0986 \text{ бит}$$

Для сравнения геологической информативности различных геофизических методов удобно использовать понятие относительной информации, которая получается путем нормировки абсолютной информации к априорной энтропии системы типов горных пород y. Относительная информация, доставляемая измерением естественной радиоактивности горных пород, в рассматриваемом случае равна



1 – колонка глубин, 2 – геологическая колонка, 3 – глины, 4 – песчаники, 5 – известняки.

Рис. 3.1

$$I_{x\to y}/H(y) = \frac{1,0986}{1,4266}\cdot 100\% = 77\%$$

Затем подсчитывается относительная геологическая информативность других геофизических методов. В комплекс геофизических методов для решения задачи литологического расчленения горных пород, изображенных на рис 3.1, кроме гамма-каротажа /ГК/ входят методы электрического каротажа кажущегося сопротивления /КС/, потенциалов собственной поляризации горных пород /ПС/ и нейтронный гамма-каротаж /НГК/. Если в результате расчета относительная информация, доставляемая измерениями КС, ПС и НГК окажется выше, чем у метода ГК, то предпочтение отдается тому методу, у которого информативность при решении задачи литологического расчленения горных пород будет максимальной.

Удобство относительной информации заключается в том, что она не зависит от априорной энтропии системы горных пород.

3.2. Задание

Расчитать абсолютную и относительную геологическую информативность каротажа потенциалов собственной поляризации горных пород (ПС), каротажа кажущегося сопротивления (КС) и нейтронного гамма-каротажа (НГК) при расчлении терригенных горных пород, приведенных на рис. 3.1 . С этой целью определить априорную энтропию системы горных пород и апостериорную энтропию, возникающую после применения каждого метода в отдельности. Для определения вероятностей встречи горных пород j-го типа, вероятностей наблюдения физического поля в i-ом интервале значений и вероятностей одновременной встречи горных пород j-го типа и наблюдений физического поля в i-ом интервале значений использовать геометрическое определение вероятности. Сравнить относительные геологические информативности использованных геофизических методов и выделить наиболее информативный метод для решения задачи о литологическом расчлении горных пород по данным каротажа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вентцель Е.С. Теория вероятностей.- М.: Физматгиз, 1962.- 564 с.

Таблица 3.1

Таблица значений функции $\eta(p) = -p\log_2 p$

p	$\eta(p)$	p	$\eta(p)$	p	$\eta(p)$
0	0	0,34	0,5292	0,68	0,3784
0,01	0,0664	0,35	0,5301	0,69	0,3694
0,02	0,0664	0,36	0,5306	0,70	0,3602
0,03	0,1518	0,37	0,5307	0,71	0,3508
0,04	0,1858	0,38	0,5305	0,72	0,3412
0,05	0,2161	0,39	0,5298	0,73	0,3314
0,06	0,2435	0,40	0,5288	0,74	0,3215
0,07	0,2686	0,41	0,5274	0,75	0,3113
0,08	0,2915	0,42	0,5256	0,76	0,3009
0,09	0,3126	0,43	0,5236	0,77	0,2903
0,10	0,3322	0,44	0,5210	0,78	0,2796
0,11	0,3503	0,45	0,5184	0,79	0,2687
0,12	0,3671	0,46	0,5153	0,80	0,2575
0,13	0,3826	0,47	0,5120	0,81	0,2462
0,14	0,3971	0,48	0,5083	0,82	0,2348
0,15	0,4105	0,49	0,5043	0,83	0,2231
0,16	0,4230	0,50	0,5000	0,84	0,2112
0,17	0,4346	0,51	0,4954	0,85	0,1992
0,18	0,4453	0,52	0,4906	0,86	0,1871
0,19	0,4552	0,53	0,4854	0,87	0,1748
0,20	0,4644	0,54	0,4800	0,88	0,1623
0,21	0,4728	0,55	0,4744	0,89	0,1496
0,22	0,4806	0,56	0,4685	0,90	0,1368
0,23	0,4877	0,57	0,4623	0,91	0,1238
0,24	0,4941	0,58	0,4558	0,92	0,1107
0,25	0,5000	0,59	0,4491	0,93	0,0974
0,26	0,5053	0,60	0,4422	0,94	0,0839
0,27	0,5100	0,61	0,4350	0,95	0,0703
0,28	0,5142	0,62	0,4276	0,96	0,0565
0,29	0,5179	0,63	0,4199	0,97	0,0426
0,30	0,5211	0,64	0,4121	0,98	0,0286
0,31	0,5238	0,65	0,4040	0,99	0,0144
0,32	0,5260	0,66	0,3957	1,00	0
0,33	0,5278	0,67	0,3871		

4. Работа № 4. НОРМАЛЬНОЕ ПОЛЕ, АНОМАЛИЯ, ПОМЕХА

4.1. Общие сведения

При геологическом истолковании геофизических данных важное значение имеют понятия нормального поля, аномалии и помехи.

Под геофизической аномалией понимается отклонение физического поля от его нормальных значений. Нормальным полем считается геофизическое поле, обусловленное однородными по физическому параметру горными породами.

Нормальное поле может быть искусственным и естественным. Нормальное искусственное поле определяется полем заданного источника в однородной бесконечной среде. Нормальное естественное поле задается полем Земли.

В частности нормальное поле силы тяжести g_0 вычисляется по Ф.Гельмерту

$$g_0 = g_{экв}\left(1 + \beta_1 \sin^2\varphi + \beta_2 \sin^2 2\varphi\right) \qquad (4.1)$$

где $g_{экв}$ – значение силы тяжести на экваторе,
φ – широта местности,
β_1 и β_2 – константы по Ф.Гельмерту.

Аномалией считается уклонение измеренного значения g от нормального $\Delta g = g - g_0$ с поправкой за высоту точки наблюдения (аномалия фая) и за промежуточный слой (аномалия Буге).

Нормальное магнитное поле T_0 является суммарным магнитным полем диполя Земли $T_д$, материков $T_м$ и космического пространства $T_е$

$$T_0 = T_д + T_м + T_е \qquad (4.2)$$

Аномалией считается уклонение измеренного магнитного поля T от нормального $\Delta T = T - T_0$. В настоящее время составлены подробные карты нормального магнитного поля (изодинамы) и градиента нормального поля (изопоры).

Аномалии делятся на региональные и локальные. В качестве модели поля принимается аддитивная модель, т.е. результаты измерений в i-ой точке f_i имеют вид

$$f_i = a_{i\,рег} + a_{i\,лок} + n_{i\,пом} \qquad (4.3)$$

где $a_{i\,рег}$ – региональная (фоновая) составляющая аномалии,
$a_{i\,лок}$ – локальная аномалия,
$n_{i\,пом}$ – помеха.

При разделении полей на региональную и локальную составляющие модель поля упрощается. При выделении региональной составляющей локальную составляющую относят к помехам

$$f_i = a_{i\,рег} + n_{i\,пом} \qquad (4.4)$$

При выделении локальной составляющей региональная составляющая относится к помехам

$$f_i = a_{i\,лок} + n_{i\,пом} \qquad (4.5)$$

При выделении аномалий действует принцип относительности. От крупных и мелких структурных единиц выделяются аномалии различных порядков. Поэтому часто используют понятие местного нормального поля, под которым понимают относительно спокойное поле, типичное в среднем для участка геофизической съемки.

При выделении локальных и региональных аномалий следует помнить, что локальная аномалия по своим линейным размерам в пять раз и более меньше изучаемой площади (профиля). Региональная аномалия по линейным размерам в пять раз и более превышает локальные аномалии.

По физико-геологической природе аномалии делятся на три группы. Одни связаны с месторождениями полезных ископаемых (рудные), другие с геологическими структурами, нарушениями, контактами (структурные), а третьи с глубинным строением Земли, земной коры (глубинные).

Под помехами понимаются факторы, осложняющие измерения геофизических полей и интерпретацию результатов измерений.

Помехи делятся на геологические, связанные с влиянием геологических неоднородностей или рельефом, и негеологические, связанные с вариацией геофизических полей во времени, случай-

ными токами и т.д.

Помехи бывают случайными и неслучайными. Случайные помехи обусловлены большим числом неконтролируемых факторов, действия каждого из которых незначительно. К неслучайным помехам относятся фоновые помехи и систематические расхождения.

Для выделения аномалий на фоне помех используются статистические критерии. Аномальными считаются точки, на которых амплитуда измеренного поля превышает уровень разрешенной изменчивости нормального поля. Уровень изменчивости характеризуется величиной общей дисперсии наблюденного поля $\mathcal{D}_o$, которая складывается из природной дисперсии $\mathcal{D}_z$, определяемой геологическими факторами, и дисперсии геофизической съемки $\mathcal{D}_c$, определяемой точностью измерений,

$$\mathcal{D}_o = \mathcal{D}_z + \mathcal{D}_c \qquad (4.6)$$

По определению $\mathcal{D} = \sigma^2$, где σ – среднеквадратическое отклонение случайной величины от ее математического ожидания. Поэтому выражение (4.6) можно переписать в виде

$$\sigma_o^2 = \sigma_z^2 + \sigma_e^2 \qquad (4.7)$$

где σ_o – общее среднеквадратическое отклонение наблюденного поля (стандарт),

σ_z – среднеквадратическая погрешность геологических помех,

σ_e – среднеквадратическая погрешность съемки

Если фоновые значения поля распределены по нормальному закону, нижний аномальный предел A_{min}, ограничивающий уровень разрешенных колебаний нормального поля, определяется соотношением

$$A_{min} = A_\varphi \pm 3\sigma_o \qquad (4.8)$$

где A_φ – среднее арифметическое частных значений нормального фона,

σ_o – общий стандарт наблюденного поля.

Если фоновые значения поля подчинены логнормальному

закону, нижний аномальный предел, ограничивающий уровень разрешенных колебаний нормального поля, определяется

$$A_{min} = A_\varphi \, \varepsilon^{\pm 3} \qquad (4.9)$$

где A_φ – среднее геометрическое частных значений нормального поля,

ε – стандартный множитель.

Фоновые значения могут превышать предел A_{min}. Однако вероятность этого равна 0,0028, а вероятность закономерной эволюции 0,9972.

Требования к уровню A_{min} могут быть снижены в случае коррелируемости точек с повышенными значениями поля по m профилям или при наличии m высоких значений подряд по профилю. При этом

$$A_{min} = A_\varphi \pm \frac{3\sigma_o}{\sqrt{m}} \quad (m \le 9) \qquad (4.10)$$

если фоновые значения распределены по нормальному закону и

$$A_{min} = A_\varphi \, \varepsilon^{\pm 3/\sqrt{m}} \quad (m \le 9) \qquad (4.11)$$

если фоновые значения подчинены логнормальному закону.

В требованиях (4.10) и (4.11) $m \le 9$, т.к. вероятность того, что 9 пикетов подряд в области нормального поля будут превышать нижний аномальный предел исчезающе мала. По теореме умножения вероятностей $P(A_\varphi > A_{min}) = 5 \cdot 10^{-3}$, т.е. высокие помехи одного знака, как независимые события маловероятны.

При планировании точности наблюдений следует руководствоваться следующими положениями.

Наблюдения с неоправданно высокой точностью ведут к увеличению затрат средств и времени, а недостаточная точность приводит к пропуску объекта.

Точность геофизической съемки определяется уровнем помех. При интенсивных помехах повышение точности измерений приводит к увеличению затрат труда и времени, но не дает желаемого ре-

зультата. Возрастает лишь фиктивная, кажущаяся, а не истинная точность.

Планирование точности наблюдений основано на трех параметрах: минимальной амплитуде аномалии, подлежащей обнаружению, или нижнем аномальном пределе A_{min}, среднеквадратической погрешности геофизической съемки σ_c, среднеквадратической погрешности геологических помех $\sigma_г$.

Нижний аномальный предел определяется путем решения прямой задачи для заданной физико-геологической модели (ФГМ) объекта поисков при наиболее неблагоприятных условиях от минимальных промышленных рудных тел или из опыта предшествующих геофизических работ.

Среднеквадратическая погрешность съемки оценивается по результатам повторных наблюдений и подсчитывается по формуле:

$$\sigma_c = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (f_i^0 - f_i^n)^2}{2n}} \qquad (4.12)$$

где – f_i^0 и f_i^n – основной и повторный замеры,
n – число парных измерений.

Повторные наблюдения выполняются в пределах нормальных или фоновых значений в количестве 3–5% от числа основных замеров.

Среднеквадратическая погрешность геологических помех определяется из соотношения (4.7)

$$\sigma_г^2 = \sigma_o^2 - \sigma_c^2 \qquad (4.13)$$

Общая среднеквадратическая погрешность наблюдений определяется по разности N наблюденных значений f_i от их нормальных (фоновых) значений $f_{фп}$ по формуле

$$\sigma_o = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} (f_i - f_{фп})^2}{N-1}} \qquad (4.14)$$

где $f_{фп}$ – среднее арифметическое результатов измерений в нормальном поле, которое подсчитывается по формуле

$$f_{фп} = \frac{\sum_{i=1}^{N} f_i}{N} \qquad (4.15)$$

Обычно точность наблюдений, методику работ и аппаратуру подбирают так, чтобы расчетная аномалия от заданной физико-геологической модели объекта поисков превышала нижний аномальный предел

$$A \geq A_{min} \geq A_{фп} \pm 3\sigma_o \qquad (4.16)$$

При выполнении геофизических работ возможны два случая, определяемые уровнем геологических помех.

Если уровень помех геологического происхождения мал $\sigma_c^2 \gg \sigma_г^2$, то разрешающая способность геофизической съемки σ_o определяется аппаратурой и методикой работ. В этом случае целесообразно применять высокоточную прецизионную аппаратуру. Например, высокоточная магниторазведка $\sigma_a = 1+2\mu Гн$ позволяет разделять слабомагнитные бокситы на фоне немагнитных известняков.

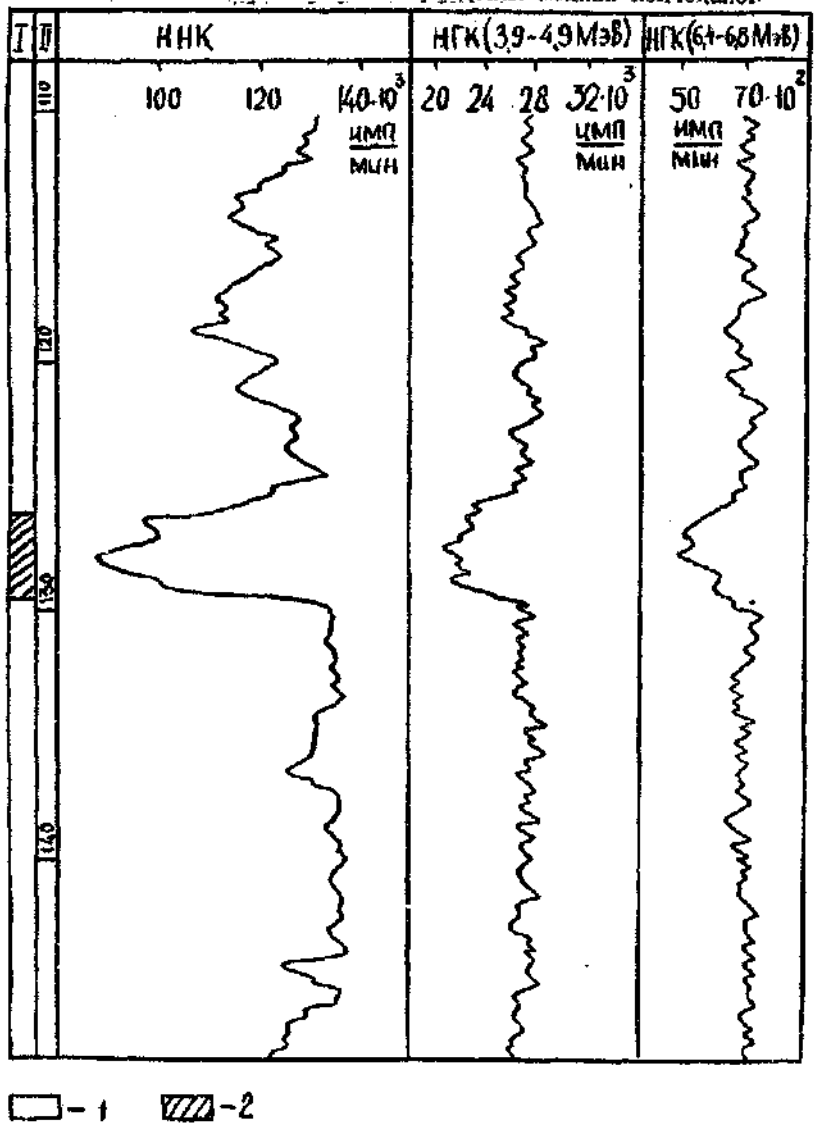
Если дисперсия геологических помех велика $\sigma_г^2 \gg \sigma_c^2$, то использовать прецизионную съемку не имеет смысла. Например, нецелесообразно применять высокоточную магниторазведку в горных районах из-за помех, связанных с рельефом местности.

В качестве примера рассмотрим результаты измерений в методе вызванных потенциалов. Путем измерений установлено, что $\sigma_c^2 = 0{,}12$, общая дисперсия наблюдений $\sigma_o^2 = 1{,}3$. При этом $\sigma_2^2 = \sigma_o^2 - \sigma_c^2 = 1{,}18$, т.е. дисперсия геологических помех велика $\sigma_2^2 \gg \sigma_c^2$ и повышение точности наблюдений нецелесообразно.

Для снижения дисперсии съемки σ_c^2 и дисперсии геологических помех $\sigma_г^2$ используются следующие приемы.

Дисперсия съемки зависит от порога чувствительности прибора, количества измерений на точке n с последующим усред-

Результаты ядерно-геофизических измерений по скв. 2428
Восточно-Семеновского месторождения медных колчеданов



1 – геологическая колонка; 11– глубина, м; 1 – серицито-кварцевая порода, 2 – медно-цинкорый колчедан

Рис. 4.1

нением $\overline{\sigma_c}^2 = \frac{\sigma_c^2}{n}$, и мешающих факторов, таких как вариации поля во времени, градиентов поля, установки и центровки прибора на точке и других. Поэтому снижение дисперсии съемки достигается с помощью более точной аппаратуры, методики работ и введения поправок за влияние мещающих факторов. Влияние каждого фактора оценивается отдельно при неизменности влияния остальных факторов.

Уменьшение дисперсии геологических помех достигается статистической обработкой исходных данных. Обычное осреднение в пределах окна из n точек позволяет уменьшить дисперсию геологических помех в n раз $\overline{\sigma_2}^2 = \sigma_2^2/n$. Кроме того помехи могут коррелировать между собой и отличаться от аномалий по частотной характеристике (по спектру). Поэтому, помехи геологического происхождения можно уменьшить путем соответствующих приемов обработки исходных данных (корреляционный и спектральный анализ).

4.2. Содержание задания

По данным ядерногеофизических измерений в скважине определить расположение вероятностей залежи медноколчеданной руды путем выделения аномальных значений регистрируемого нейтронного или гамма-поля. Полевые измерения проведены на Восточно-Семеновском месторождении медно-цинковых колчеданов нейтрон-нейтронным и нейтронным гамма-методом. Результаты измерений изображены в виде диаграмм нейтрон-нейтронного (ННК) и нейтронного гамма-каротажа (НГК) на рис.4.I и приведены в табл.4.I.

Измерения нейтронного поля выполнены по тепловым нейтронам в интегральном варианте. Нейтронные гамма-измерения выполнены в спектрометрическом варианте в области захватного гамма-излучения породообразующих элементов (3,9–4,9 *Мэв*) и в области рудных элементов (6,4–6,8 *Мэв*).

Для исследования скважин методом НГК использовалась аппаратура СГСЛ-2 и каротажный подъемник СК-I. Нейтронное поле создавалось с помощью Ро-Ве-источника мощностью $4 \cdot 10^7$ нейтрон/с. Методикой работ предусматривалось выполнение нейтрон-нейтронного каротажа по тепловым нейтронам. Для регистрации нейтронов использовался детектор типа ЛДИМ.

Наличие цинка и кадмия в медных рудах месторождений приводит к тому, что рудные интервалы выделяются минимумами скорости счета тепловых нейтронов и захватного гамма-излучения. Содержание породообразующих элементов определялось по скорости счета захватного гамма-излучения в области аналитических линий кремния 3,9–4,9 МэВ. Для определения содержания меди использовалась область спектра 6,4–6,8 МэВ.

Таблица 4.1

РЕЗУЛЬТАТЫ

ЯДЕРНО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ПО СКВАЖИНЕ № 2428

ГОСТОЧНО-СЕМЕНОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ МЕДНО-ЦИНКОВЫХ КОЛЧЕДАНОВ

Глубина м	Значения ННК, имп/мин		Значения НГК, (3,9–4,9 МэВ), имп/мин		Значения НГК (6,4–6,8 МэВ), имп/мин	
	основн.	повторн.	основн.	повторн.	основн.	повторн.
III	$129 \cdot 10^3$	$128 \cdot 10^3$	$27{,}0 \cdot 10^3$	$27{,}5 \cdot 10^3$	$73 \cdot 10^2$	$72 \cdot 10^2$
II2	I26	I26	26,5	26,8	68	70
II3	II9	I20	27,2	27,0	70	7I
II4	II3	II4	27,2	27,0	70	7I
II5	I20	II9	27,6	27,5	76	74
II6	I2I	I22	27,0	28,0	70	70
II7	II4	II4	26,0	27,0	73	72
II8	II3	III	27,0	26,0	75	74
II9	I09	III	28,0	27,0	68	70
I20	I22	I2I	27,0	27,0	73	72
I2I	II5	II5	27,8	27,6	70	70
I22	I23	I22	28,5	28,3	75	74
I23	I26	I25	26,0	26,0	70	72
I24	I27	I25	27,8	27,6	75	74
I25	I2I	I2I	26,0	26,0	70	70
I26	II0	I07	24,0	24,5	62	62
I27	97	98	22,0	22,5	52	50
I28	87	89	22,0	22,0	55	53
I29	I00	I02	22,0	21,5	60	6I
I30	I34	I34	27,5	27,4	78	76

Продолжение таблицы 4.I

Глубина м	Значения ННК, имп/мин		Значения НГК (3,9–4,9 МэВ), имп/мин		Значения НГК (6,4–6,8 МэВ), имп/мин	
	основн.	повт.	основн.	повторн.	основн.	повторн.
I3I	$133 \cdot 10^3$	$134 \cdot 10^3$	$27{,}0 \cdot 10^3$	$27{,}0 \cdot 10^3$	$74 \cdot 10^2$	$74 \cdot 10^2$
I32	I34	I34	26,7	26,5	72	72
I33	I35	I35	26,5	26,3	67	68
I34	I33	I34	28,0	27,5	68	68
I35	I30		27,8		72	
I36	I28		27,5		73	
I37	I34		28,0		70	
I38	I36		27,0		70	
I39	I35		27,5		72	
I40	I36		27,5		73	
I4I	I35		27,5		70	
I42	I36		27,0		75	
I43	I33		28,0		70	
I44	I30		28,0		72	
I45	I35		28,0		75	
I46	I28		27,0		73	
I47	I26		27,0		75	
I48	I20		27,5		68	
I49	I2I		28,0		73	
I50	I28		28,0		72	
I5I	I23		27,2		75	
I52	I29		26,5		70	
I53	I25		27,2		75	
I54	$118 \cdot 10^3$		$26{,}5 \cdot 10^3$		$72 \cdot 10^2$	

В таблице приведены результаты основных и повторных измерений нейтронного и гамма-поля при выполнении нейтрон-нейтронного и нейтронного гамма-каротажа. Результаты повторных наблюдений предназначены для оценки точности данных ННК и НГК.

Требуется выполнить следующее.

Скопировать на кальку диаграммы нейтрон-нейтронного каро-

така по тепловым нейтронам и нейтронного гамма-каротажа в интервалах энергий 3,9–4,9 МэВ и 6,4–6,8 МэВ. Оценить структуру поля. Выделить местное нормальное поле для каждой диаграммы каротажа, учитывая, что рудная залежь выделяется понижениями значения поля на диаграммах ННК и НГК.

Для каждой из наблюденных кривых вычислить значения общей среднеквадратической погрешности наблюдений σ_0, среднеквадратической погрешности съемки σ_c и среднеквадратической погрешности геологических помех σ_1 используя для этого соотношения (4.I4), (4.I2), (4.I3). Найти нижний аномальный предел для каждого вида ядернотеофизических измерений, используя для этого соотношение (4.8). Сопоставить уровень помех геологического происхождения с точностью геофизических наблюдений. Дать рекомендации о необходимой точности измерений в каждом методе и целесообразности увеличения точности для решения поставленной задачи.

По вычисленным значениям нижнего аномального предела выделить аномалии нейтронного и гамма-поля на диаграммах ННК и НГК. Дать геологическое истолкование выделенных аномалий.

5. Работа № 5. КОМПЛЕКСНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФУНКЦИИ КОМПЛЕКСНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ

5.I. Общие положения

Функция комплексного показателя (ФКП) применяется в тех случаях, когда объект исследований не создает устойчивых сигналов в полях разных методов, когда эти сигналы малы и сопоставимы с инструментальными и геологическими помехами. Способ предложен Г.С.Вахромеевым /I/. Суть способа заключается в составлении обобщенной функции комплексного показателя U, которая представляет собой результат смешения сигналов разной природы, выраженных в цифровой форме.

Функция комплексного показателя служит для свертывания информации, полученной несколькими геофизическими методами, приведения наблюдений к уровню нормального поля, выделения слабых аномалий на фоне помех и разделения выявленных комплексных аномалий на перспективные и неперспективные.

Для определения ФКП необходимо предварительно перевести результаты всех частных методов в равноточные безразмерные величины показателей контрастности γ. Показатель контрастности j-го метода в i-ой точке подсчитывается по формуле

$$\gamma_{ji} = \frac{A_{ji} - \bar{A}_j}{S_j} \qquad (5.I)$$

где γ_{ji} – показатель контрастности j-го метода в i-ой точке,

A_{ji} – значение j-го измеренного признака в i-ой точке профиля,

$\bar{A}_j$ – среднеарифметическое (фоновое) значение j-го признака,

S_j – стандарт j-го признака, который подсчитывается по формуле

$$S_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (A_{ji} - \bar{A}_j)^2}{n-1}} \qquad (5.2)$$

где n – число измерений j-го признака по профилю.

Преимуществом использования понятия контрастности в виде (5.I), когда значения сигнала нормируются по стандарту, является то, что значения показателя контрастности γ_{ji} распределены по закону Гауса с нулевым средним $\overline{\gamma_{ji}} = 0$ и единичным стандартом $S(\gamma_j) = I$.

Вид функции комплексного показателя выбирается над эталонным объектом по материалам натурного моделирования или исходя из физико-геологической модели искомого объекта так, чтобы добиться максимальной контрастности аномалий ФКП над объектом при одновременном подавлении аномалий ФКП над объектами-помехами.

В зависимости от формы и знака аномалий отдельных методов различают четыре возможных случая.

I. Полезные сигналы частных методов имеют одинаковую форму и одинаковый знак. В этом случае

$$Q_i = \sum_{j=1}^{p} \gamma_{ji} \qquad (5.3)$$

где Q_i – значение функции комплексного показателя в точке i профиля,

p – количество частных методик,

γ_{ji} – значение j -го частного метода в i -ой точке профиля в безразмерных величинах показателя контрастности.

Примером для рассматриваемого случая могут служить аномалии Δg и ΔZ над вертикально намагниченным шаром с избыточной плотностью, которые имеют сходный вид.

2. Полезные сигналы частных методов имеют примерно одинаковую форму, но различны по знаку, тогда

$$Q_i = \sum_{j=1}^{p} |\gamma_{ji}| \qquad (5.4)$$

Примером может служить положительная гравитационная аномалия и отрицательная аномалия естественного поля над залежью медной руды.

3. Полезные аномалии имеют примерно одинаковую форму и знак, но для некоторых методов наличие сигнала – не положи-

Пример обработки сигналов при подсчете ФКП над обводненным контактом двух горных пород

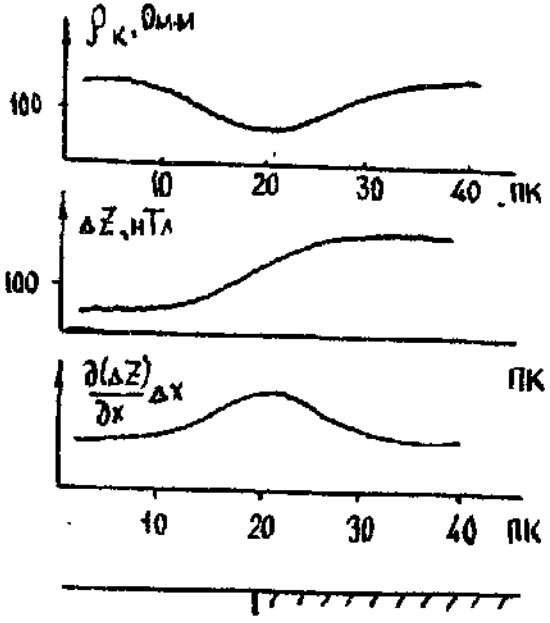


Рис. 5.1

тельный фактор контроля искомого объекта, а отрицательный. При этом

$$Q_i = \sum_{j=1}^{\rho} \gamma_{ji} - \sum_{k=1}^{q} \gamma_{ki} \qquad (5.5)$$

где ρ и q – число методов, аномалии которых являются, соответственно, положительными и отрицательными факторами контроля искомого объекта. Например, при поисках сульфидных кобальто-пиритовых зон, положительные аномалии ΔZ являются фактором неперспективности оруденения, так как связаны с дайками диабазов. Перевод магниторазведки в разряд негативных факторов подчеркивает комплексную аномалию над кобальто-пиритовыми рудами и одновременно подавляет неперспективные ореолы кобальта над дайками диабазов, которые в рассматриваемом случае относятся к разряду помех.

4. Полезные сигналы различны по форме и знаку. В этом случае один из сигналов обрабатывается так, чтобы в результате обработки его вид был сходен с видом других сигналов.

Например, контакт двух горных пород выделяется по данным электроразведки (СЭП) минимумом.

По данным магниторазведки (ΔZ) аномалия имеет вид ступени, рис.5.I. Для получения сходных кривых достаточно результаты магниторазведки графически продифференцировать

$$\Delta Z_x' = \frac{d(\Delta Z)}{dx} \Delta x$$

а затем перейти к расчету ФКП по формуле, соответствующей второму случаю (5.4)

$$Q = |\gamma_{\rho_x}| + |\gamma_{\Delta Z_x'}|$$

Другим примером может служить мощный намагниченный пласт с избыточной плотностью. Он выделяется по данным гравитационной разведки положительной аномалией Δg.

По данным магниторазведки (ΔZ) аномалия имеет несимметричный вид с двумя экстремумами, рис.5.2. Для получения сходного вида кривых из аномалии ΔZ следует выделить кривую арктангенсов и после этого перейти к подсчету ФКП по формуле (5.3).

Пример обработки сигналов при подсчете ФКП
нал мощным наклонным вертикально намагниченным пластом с избыточной плотностью

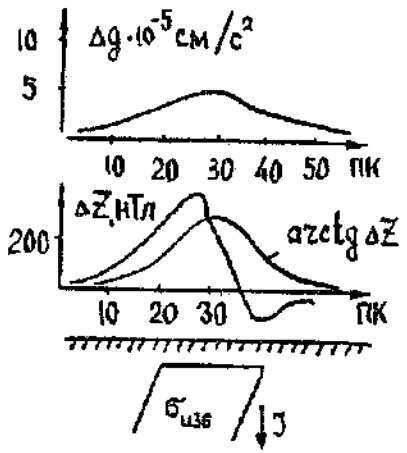
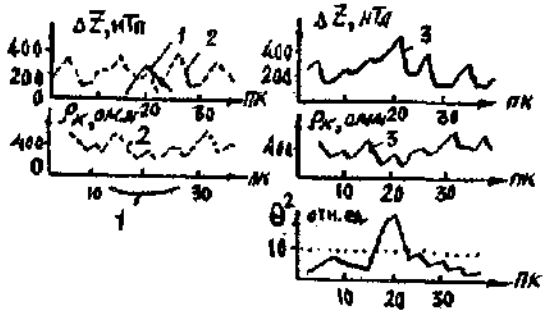


Рис. 5.2

Модельный пример использования ФКП в виде
при поисках кимберлитовых тел в траппах /по Г.С.Рахромееву/



1 – вид искомой аномалии от кимберлитовых тел,
2 – график помехи, 3 – суммарный сигнал аномалии и помехи

Рис. 5.3

$$Q = \gamma_{\Delta g} + \gamma_{arctg \Delta Z}$$

Учет знака полезных сигналов можно осуществить также с помощью ФКП, заданной в виде квадратов контрастностей отдельных методов. При этом подсчет ведется по формуле

$$Q_i^2 = \sum_{j=1}^{m} \gamma_{ji} - \sum_{k=1}^{n} \gamma_{ki}^2 \qquad (5.6)$$

где m и n – число методов, аномалии которых являются, соответственно, положительными и отрицательными факторами контроля искомого объекта.

Значимость результата оценивается по критерию χ^2 ($\chi\mu$ – квадрат). При $Q^2 > \chi^2$ аномалия Q^2 значима.

Возможности методики задания ФКП в виде квадратов контрастностей отдельных методов рассмотрены на модельном примере, рис.5.3, где решается задача поисков кимберлитовых тел в траппах по данным магниторазведки (ΔZ) и электроразведки ($\rho_к$). Согласно физико-геологической модели кимберлитовой трубки над ней скидается положительная аномалия ΔZ и пониженное значение $\rho_к$. В каждом из методов отмечаются интенсивные помехи, превосходящие по величине аномалию от кимберлитовой трубки. На графике суммарного поля полезный сигнал визуально не обнаруживается. Расчет функции комплексного показателя в виде Q^2 дает в центральной части профиля отчетливую аномалию, надежно превышающую предельную величину χ^2-критерия, который при 2%-ном уровне значимости равен $\chi^2_{\alpha=0,02} = 9,8$. Аномалия ФКП в виде Q^2 позволяет локализовать местоположение кимберлитовой трубки.

Введем понятие показателя контрастности ФКП соотношением

$$\gamma_{Qi} = \frac{Q_i - Q_\varphi}{S_Q} \qquad (5.7)$$

где γ_{Qi} – показатель контрастности ФКП в i-ой точке профиля, Q_i – значение ФКП в i-ой точке профиля, Q_φ – фоновое значение ФКП, S_Q – стандарт ФКП.

Значимость аномалий ФКП оценивается по нижнему аномальному

пределу $Q_a = 3S_Q$, где S_Q – стандартное отклонение ФКП.

Для аномалий коррелированных по n точкам или профилям ($n \leq 9$) нижний аномальный предел можно снизить. Он будет равен $Q_a = 3\sqrt{m/n}$.

Преимуществом использования ФКП является то, что контрастность аномалий ФКП существенно превышает контрастность отдельных методов. Амплитуда аномалий ФКП складывается из амплитуд аномалий отдельных методов. Она пропорциональна числу методов m, т.е. $Q \sim m$. Если значения сигналов отдельных методов представлены в виде показателей контрастности (5.I), то дисперсии их единичны, т.е. $D(\gamma_1) = D(\gamma_2) = D(\gamma_3) = \cdots D(\gamma_m) = I$, где m – число методов. При этом дисперсия ФКП для некоррелированных признаков будет равна

$$D_Q = \sum_{i=1}^{m} D(\gamma_i) = m\,D(\gamma_i) = m$$

Откуда следует

$$S_Q = \sqrt{m} \qquad (5.8)$$

При подсчете ФКП показатели отдельных методов суммируются. Поскольку фоновые значения показателей контрастности отдельных методов равны нулю, то и сумма их равна нулю, т.е. фоновые значения ФКП равны нулю $Q_\varphi = 0$.

При этом контрастность ФКП будет

$$\gamma_Q = \frac{Q - Q_\varphi}{S_Q} = \frac{m}{\sqrt{m}} = \sqrt{m} \qquad (5.9)$$

Таким образом, контрастность аномалии ФКП в $\sqrt{m}$ раз больше, чем контрастность отдельных методов.

Например, обнаружен комплексный рудный ореол, содержащий медь, цинк и свинец. В условных единицах фоновые содержания свинца, цинка и меди составляют $Pb_\varphi = I0$, $Zn_\varphi = 20$, $Cu_\varphi = 50$. Максимальные концентрации, соответственно, равны $Pb_{max} = I5$, $Zn_{max} = 30$, и $Cu_{max} = 65$. Стандартные отклонения примем равными единице $S_{Cu} = S_{Zn} = S_{Pb} = I$. Подсчитаем контрастность суммарного ореола, если показатели контрастности отдельных измерений подсчитываются по формуле (5.I).

В рассматриваемом случае максимальные значения показателей контрастности отдельных измерений будут

$$\gamma_{Pb} = \frac{15-10}{1} = 5$$

$$\gamma_{Zn} = \frac{30-20}{1} = 10$$

$$\gamma_{Cu} = \frac{65-50}{1} = 15$$

Фоновые значения контрастностей отдельных измерений равны нулю. Максимальное значение ФКП суммарного ореола будет равно

$$Q_{max} = \gamma_{Pb} + \gamma_{Zn} + \gamma_{Cu} = 5 + 10 + 15 = 30$$

Фоновое значение ФКП суммарного ореола равно нулю $Q_\phi = 0$. Стандартное отклонение ФКП суммарного ореола будет

$$S_Q = \sqrt{S_{Pb}^2 + S_{Zn}^2 + S_{Cu}^2} = \sqrt{3}$$

При этом контрастность ФКП суммарного ореола равна

$$\gamma_Q = \frac{Q_{max} - Q_\phi}{S_Q} = 17$$

Таким образом, контрастность аномалии ФКП превышает значения контрастностей отдельных методов.

Контрастность аномалии ФКП можно повысить трансформацией исходных данных, например, подавлением высокочастотной помехи путем сглаживания методом среднего арифметического.

Если n числе точек в сглаживающем окне, то вычисление скользящего среднего уменьшает дисперсию фона в n раз.

Действительно, контрастность сглаженной аномалии будет

$$\tilde{\gamma}_{ji} = \frac{A_{ji} - \bar{A}_j}{\tilde{S}_j} \qquad (5.11)$$

где $\tilde{\gamma}_{ji}$ – сглаженные значения контрастности j-го метода в i-ой точке,

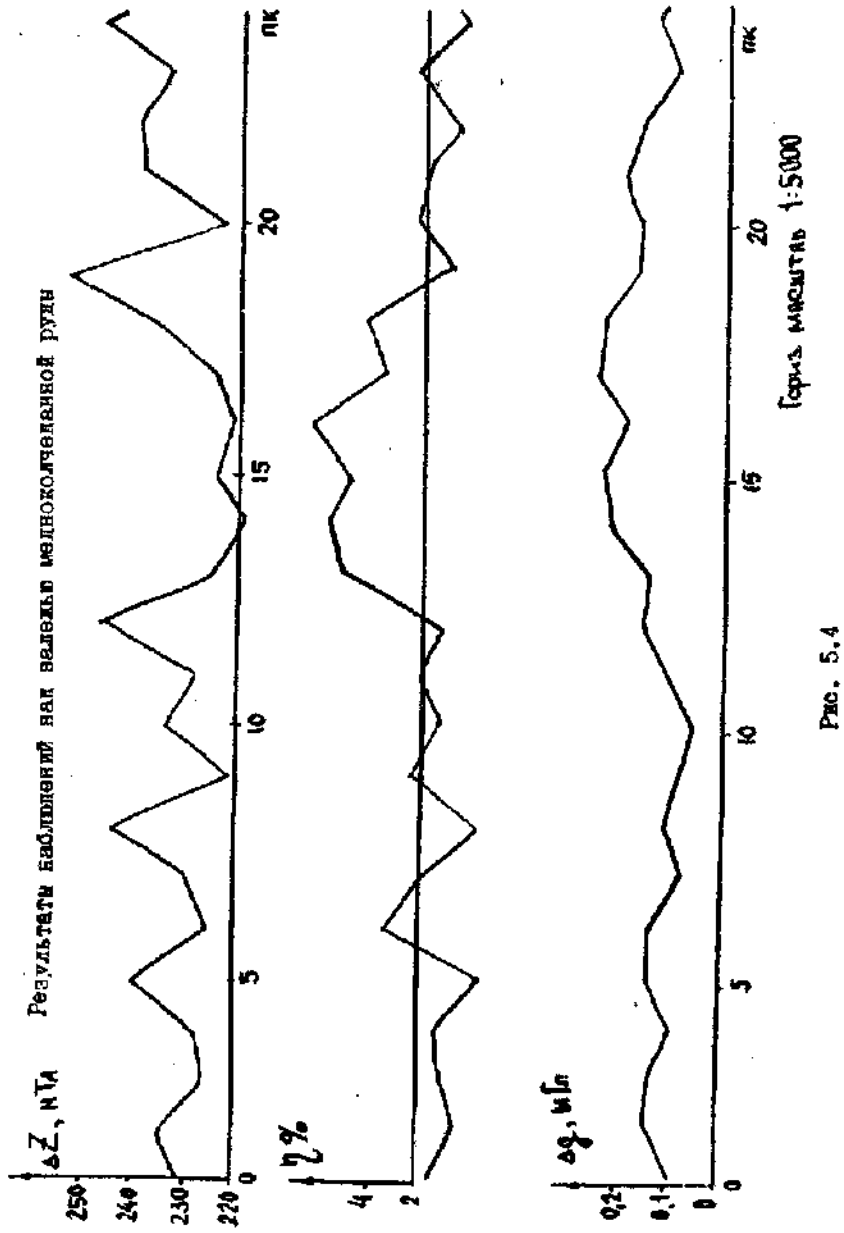


Рис. 5.4

$\tilde{S}_i$ – стандарт сглаженных значений контрастности, который связан со стандартом несглаженных значений соотношением

$$\tilde{S}_i = \frac{S_i}{\sqrt{n}} \qquad (5.12)$$

Подставляя (5.12) в (5.11) находим

$$\tilde{\gamma}_{ii} = \gamma_{ii}\sqrt{n} \qquad (5.13)$$

Таким образом, простое сглаживание измеренных значений по n точкам повышает контрастность аномалии в $\sqrt{n}$ раз.

ЗАДАНИЕ

Определить на профиле местоположение вероятной залежи медноколчеданной руды путем вычисления ФКП. Полевые измерения проводились тремя методами: магнитометрией, гравиметрией и электрометрией (метод вызванных потенциалов). Результаты наблюдений изображены в виде графиков на рис.5.4 и приведены в таблице 5.1. Из значений Δg и ΔT предварительно была исключена региональная составляющая.

Требуется определить структуру ФКП, учитывая следующие физико-геологические условия. Залеж медноколчеданной руды имеет форму круто-падающей линзы небольшой мощности до 15 метров в поперечнике, залегает внутри вулканогенной толщи и имеет первичный ореол сульфидной минерализации вдоль плоскости линзы. На участке залежи наблюдается повышение электропроводности и поляризуемости горных пород.

Руда представлена массивным медным и серным колчеданом. Минерал магнетита и пирротина в области залежи отсутствуют. Таким образом, зона рудной залежи характеризуется избыточной плотностью и относительным понижением магнитных свойств. Рудовмещающая толща покрыта рыхлыми осадками с переменной мощностью 10–20 м.

Необходимо вычислить значения показателя контрастности для каждого метода используя для этой цели данные таблицы 5.1. Оценить надежность выделения отдельных экстремумов наблюденных полей,

сравнив величины $(\Delta g_i - \overline{\Delta g})$, $(\Delta z_i - \overline{\Delta z})$ и $(\eta_i - \bar{\eta})$ со значениями тройного стандарта соответствующего метода. Экстремум можно считать надежной аномалией в том случае, если его амплитуда A превосходит величину тройного стандарта $A \geq 3\sigma$.

Определив структуры ФКП, подсчитать ее значение на всех пикетах профиля. Построить график ФКП по профилю. Указать на профиле положение предполагаемой залежи медноколчеданной руды, используя для оценки надежности выделения аномалии ФКП правило трех сигм. Для этого рассчитать и провести на профиле с результатами расчета ФКП линии тройного стандарта ФКП.

Таблица 5.I

Результаты наблюдения геофизических полей
по профилю на месторождении медных колчеданов

Пикеты	Значения ΔT, нТл		Значения Δg, мГл		Значения φ, %	
	варианты		варианты		варианты	
	I	2	I	2	I	2
I	I0	2I	I,2	2,I	5	7
2	I3	23	0,7	I,8	2	5
3	5	I6	I,4	I,5	4	6
4	7	I5	0,5	I,4	5	8
5	20	30	2,2	3,I	0	3
6	5	I5	I,7	2,6	I0	I2
7	I0	20	I,0	2,0	6	8
8	25	35	I,7	2,7	I	3
9	2	I7	I,9	2,8	6	9
I0	I5	25	I,2	2,I	5	8
II	8	I8	2,2	3,2	6	9
I2	I4	24	2,3	3,4	9	I2
I3	5	I5	2,7	3,7	I5	I7
I4	0	I0	4,2	5,2	I6	I8
I5	4	I4	3,6	4,6	I4	I6
I6	I	II	5,7	6,6	I7	2I
I7	4	I4	3,2	4,2	I0	I3
I8	I5	25	I,9	2,9	I2	I5
I9	20	30	2,I	3,0	4	7
20	2	I2	I,7	2,7	7	I0
2I	20	30	I,5	2,5	6	9
22	20	30	I,7	2,7	3	6
23	I3	23	0,7	I,6	7	I0
24	26	36	2,I	3,2	2	5
25	5	I6	I,6	2,6	6	8
26	I6	28	I,0	I,I	2	6
27	I6	25	I,7	2,5	5	7

ЛИТЕРАТУРА

1. Комплексная интерпретация геофизических данных: учебное пособие / Ю. Б. Давыдов, А. Г. Талалай, И. Е. Шинкарюк. Урал. госуд. горный ун-т. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2018. – 128 с.

2. Сапожников В. М. Комплексирование геофизических методов: учебное пособие/ Уральский гос. горный ун-т. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2010. – 76 с.

3. Никитин А.А., Хмелевской В.К. Комплексирование геофизических методов: учебник. – М.: ВНИИгеосистем, 2012. – 346 с. Гриф УМО.

4. Долгаль А. С. Комплексирование геофизических методов: учебное пособие. – Пермь: Пермский гос. нац. исслед. ун-т, 2012. – 167 с.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебно-методическому комплексу
_____ С.А. Упоров

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Специальность:

21.05.03 Технология геологической разведки

форма обучения: очная, заочная

Автор: Александрова Ж. Н.

Екатеринбург

2020

ФГБОУ ВО

«Уральский государственный горный университет»

Ж. Н. Александрова

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Учебно-методическое пособие
к практическим занятиям и самостоятельной работе
по дисциплине «Радиационная безопасность» для студентов
специализаций «Геофизические методы исследования скважин» и
«Геофизические методы поисков и разведки МПИ»
специальности 21.05.03 Технология геологической разведки
очной и заочной формы обучения

Часть 1
Расчет доз внешнего и внутреннего облучения

Екатеринбург
2020

ФГБОУ ВО
«Уральский государственный горный университет»

ОДОБРЕНО
методической комиссией
факультета геологии и геофизики
Председатель комиссии



_____ В. И. Бондарев
«20» марта 2020 г.

Ж. Н. Александрова

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Учебно-методическое пособие
к практическим занятиям и самостоятельной работе
по дисциплине «Радиационная безопасность» для студентов
специализаций «Геофизические методы исследования скважин» и
«Геофизические методы поисков и разведки МПИ»
специальности 21.05.03 Технология геологической разведки
очной и заочной формы обучения

Часть 1
Расчет доз внешнего и внутреннего облучения

Издание УГГУ Екатеринбург, 2020

УДК 550.83
А46

Рецензент: Щапов В.А., старший научный сотрудник
Института геофизики УрО РАН, д-р геол.-мин. наук

Александрова Ж.Н.

А46 Лабораторный практикум по радиационной безопасности: учебно-методическое пособие к практическим занятиям и самостоятельной работе по дисциплине "Радиационная безопасность" для студентов специализаций «Геофизические методы исследования скважин» и «Геофизические методы поисков и разведки МПИ» специальности 21.05.03 − «Технология геологической разведки» очной и заочной формы обучения; Часть 1. Расчет доз внешнего и внутреннего облучения / Ж. Н. Александрова; Уральский гос. горный ун-т. – Екатеринбург: изд-во УГГУ, 2020. – 32 с.

В учебно-методическом пособии кратко изложены сведения об ионизирующих излучениях и их основных свойствах, рассмотрено воздействие ионизирующего излучения на ткани организма, приведены специальная терминология по вопросам радиационной безопасности и значения предельно допустимых уровней облучения, описана методика расчета доз при внешнем и внутреннем облучении. Пособие содержит руководства к выполнению трех лабораторных работ по расчету доз облучения в различных ситуациях.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся специализациям «Геофизические методы исследования скважин» и «Геофизические методы поисков и разведки МПИ» по специальности «Технология геологической разведки»

© Александрова Ж.Н., 2020
© Уральский государственный
горный университет, 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ……..….. 4

1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ……...……. 5

1.1. Ионизирующие излучения и их свойства ……...…… 5

1.2. Специальная терминология по вопросам радиационной безопасности ..…. 9

1.3. Воздействие ионизирующего излучения на ткани организма ……..… 12

1.4. Расчет доз облучения ……... 17

1.5. Предельно допустимые уровни облучения ……...…… 21

2. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ……..... 22

2.1. Определение предельно допустимого времени пребывания на различных расстояниях от источника гамма-излучения ……...…. 22

Задание ……..… 22

Материалы и оборудование ……...… 22

Порядок выполнения работы ……..… 22

Контрольные вопросы …… 24

Содержание отчета ……..…… 24

2.2. Определение дозы внутреннего облучения при попадании радиоактивного вещества внутрь организма …… 25

Задание ……..… 25

Материалы и оборудование ……...… 26

Порядок выполнения работы ……..… 26

Контрольные вопросы …… 27

Содержание отчета ……..…..27

2.3. Определение дозы внешнего облучения при работе на территориях с повышенной радиоактивностью ……...…. 27

Задание ……..…… 27

Материалы и оборудование ……...… 29

Порядок выполнения работы ……..…… 29

Контрольные вопросы ……..……...… 31

Содержание отчета ……...… 31

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ …….. 32

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время во многих отраслях практической деятельности человека применяются радиоактивные вещества и ионизирующие излучения. Расширяется применение радиоактивных изотопов и источников ионизирующих излучений в промышленности, медицине, науке, технике, геологоразведочной отрасли. В условиях роста количества работающих с ионизирующими излучениями вопросам радиационной безопасности должно придаваться большее значение.

Радиационная безопасность – это составная часть экологической безопасности человека. Обеспечение экологической безопасности при обращении с радиоактивными веществами предполагает такое обращение с ними, при котором наступление вредных последствий для здоровья и жизни человека было бы невозможно.

"Граждане Российской Федерации, иностранные граждане и лица без гражданства, проживающие на территории Российской Федерации, имеют право на радиационную безопасность. Это право обеспечивается за счет проведения комплекса мероприятий по предотвращению радиационного воздействия на организм человека ионизирующего излучения выше установленных норм, правил и нормативов, выполнения гражданами и организациями, осуществляющими деятельность с использованием источников ионизирующего излучения, требований к обеспечению радиационной безопасности" (статья 22 Федерального закона «О радиационной безопасности населения»).

Радиационная безопасность достигается совокупностью мер: правовых, технических, экономических, воспитательных и т.д. Ряд мер находится в ведении государства и специальных служб. Но многое зависит непосредственно от лиц, работающих с радиоактивными веществами – от их теоретических знаний и практических навыков при обращении с источниками ионизирующих излучений. Поэтому обучение персонала в области обеспечения радиационной безопасности приобретает важное значение.

1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Ионизирующие излучения и их свойства

Ионизация. Ионизация – это процесс образования разделенных электрических зарядов. Процесс образования положительного иона состоит в вырывании электрона с электронной оболочки нейтрального атома, для чего необходимо затратить некоторую энергию. Для большинства атомов эта энергия лежит в пределах от 9 до 30 эВ. Если энергия, переданная атому, меньше энергии, необходимой для вырывания электрона, то ионизации не происходит. В этом случае может произойти возбуждение атома. Возбужденный атом обладает избытком энергии, которая освобождается в виде излучения (обычно ультрафиолетового) при возвращении атома в нормальное состояние.

Электрон, вырванный из атома в результате ионизации, как правило, не остается долго в свободном состоянии, он “прилипает” к нейтральному атому или нейтральной молекуле, образуя отрицательный ион. Таким образом, в обычных условиях ионы образуются парами. Возникшие ионы исчезают в результате их рекомбинации, т.е. процесса воссоединения отрицательных и положительных ионов, в котором образуются нейтральные атомы или молекулы.

Число ионов, исчезающих из единицы объема среды в единицу времени в результате рекомбинации q_α, пропорционально концентрации положительных и отрицательных ионов:

$$q_\alpha = \alpha n_1 n_2, \qquad (1)$$

где n_1 – число положительных ионов в 1 см^3, n_2 - число отрицательных ионов в 1 см^3, α - коэффициент рекомбинации, см^3/с (для малых ионов в воздухе при нормальных условиях α=1,6·10^{-6} см^3/с).

Ионизирующие излучения. Ионизирующими называются излучения, которые прямо или косвенно способны ионизировать среду. К ним относятся рентгеновское и γ-излучение, а также излучения, состоящие из потоков заряженных или нейтральных частиц, обладающих достаточными для ионизации энергиями.

Радиоактивные препараты обычно испускают ионизирующие α- и β-частицы, γ-лучи и нейтроны. Кроме перечисленных видов излучений могут быть использованы потоки протонов, тяжелых ядер, а также частицы, возникающие при различных ядерных реакциях.

Альфа-частицы — это положительно заряженные ядра атомов гелия. Обладают малой проникающей способностью. Оценить пробег α-частиц в воздухе можно с помощью следующей эмпирической формулы:

$$R_\alpha(E) = 0{,}316 \cdot E_\alpha^{\,3/2},$$

где $R_\alpha(E)$ - пробег α-частицы в воздухе в см; E_α - энергия α-частицы в МэВ.

Наиболее проникающие α-частицы могут пройти слой воздуха при нормальном атмосферном давлении не более 11 см. В твердом веществе пробег α-частиц составляет микроны и может быть найден с помощью эмпирической зависимости *Брегга-Климэна* :

$$L_\alpha(E) = 3{,}2 \cdot 10^{-4} \cdot R_\alpha(E) \cdot \frac{\sqrt{A}}{\rho},$$

где A - атомный вес, а ρ - плотность среды переноса α-частицы с начальной энергией E.

Например, в воде пробег α-частиц не превышает 150 микрон, а верхний слой отмерших клеток кожи человека (эпидермис) защищает его от внешнего α-излучения.

Альфа-частицы обладают большой ионизирующей способностью. Вследствие большой начальной энергии при столкновении с молекулами поглощающей среды α-частица на пути своего движения образует сотни тысяч пар ионов.

Бета-частицы — это поток электронов или позитронов. Их проникающая способность значительно выше, чем у α-частиц. Оценить пробег электронов в среде можно, используя следующую эмпирическую связь:

$$\begin{cases} R_m = 0{,}407 \cdot E_{\max}^{1.38} & при \quad E_{\max} \le 0{,}8\ МэВ, \\ R_m = 0{,}54 \cdot E_{\max} & при \quad E_{\max} \rangle\ 0{,}8\ МэВ, \end{cases}$$

где R_m - массовый пробег электронов в *г/см²*; E_{max} - максимальная энергия электронов в *МэВ*.

Наиболее быстрые β-частицы могут пройти слой алюминия до 5 мм. Ионизирующая способность меньше, чем у α-частиц.

Рентгеновские и γ-лучи — это электромагнитное излучение высокой энергии. Обладают большой проникающей способностью, изменяющейся в широких пределах. Ионизирующая способность значительно меньше, чем у α- и β-частиц.

Нейтроны — нейтральные частицы, обладающие большой проникающей способностью. Ионизирующая способность меньше, чем у α- и β-частиц.

Протоны — положительно заряженные ядра водорода. При одинаковой энергии с α- и β-частицами протоны занимают промежуточное положение между ними по проникающей и ионизирующей способностям.

Космические лучи — лучи, приходящие на Землю из космического пространства. До поверхности Земли космические лучи доходят значительно преобразованными в результате их взаимодействия с атмосферой. Первичные космические лучи состоят в основном из протонов и ядер тяжелых элементов. В результате их взаимодействия с воздухом атмосферы возникают новые частицы: мезоны, электроны, нейтроны и т.д. В результате взаимодействия нейтронов космического излучения с ядрами атомов азота в атмосфере постоянно образуется радиоактивный изотоп углерода – C^{14}. Радиоактивный изотоп водорода – тритий также образуется в атмосфере под действием космического излучения. Космические лучи обладают очень большой проникающей способностью.

В таблицах 1 – 3 приведены данные по прохождению α- и β-частиц и протонов в некоторых средах.

Пробеги α-частиц и полная ионизация в ткани плотностью 1 г/см^3 [4]

таблица 1

Энергия α-частиц, *МэВ*	В воздухе, *см*	В алюминии, *мкм*	В биологической ткани, *мкм*	Полная ионизация, *число пар ионов х 10^5*
4,0	2,5	16	31	1,1
4,5	3,0	20	37	1,3
5,0	3,5	23	43	1,4
5,5	4,0	26	49	1,6
6,0	4,6	30	56	1,7
6,5	5,2	34	64	1,9
7,0	5,9	38	72	2,0
7,5	6,6	43	81	2,1
8,0	7,4	48	91	2,3
8,5	8,1	53	100	2,4
9,0	8,9	58	110	2,6
9,5	9,8	64	120	2,7
10,0	10,6	69	130	2,9

Средний пробег протонов и полная ионизация в воздухе и ткани плотностью 1 *г/см^3* [3]

таблица 2

Энергия протонов, *МэВ*	Воздух, *см*	Мягкие биологические ткани, *мкм*	Полная ионизация, *число пар ионов*
1	2,3	23	9154
2	7,3	73	15841
3	14,7	147	22344
4	24,1	241	28438
5	35,5	355	34293
6	48,6	486	39901
7	64,2	642	45967
8	81,3	813	51707
9	100,4	1004	57529
10	121,1	1211	63214
15	238,0	2380	-

Максимальный пробег β-частиц в различных средах [8]

таблица 3

Энергия β-частиц, *МэВ*	В воздухе, *м*	В алюминии, *мм*	В мягкой ткани, *мм*
0,01	0,00229	0,00127	0,00247
0,5	1,601	0,837	1,77
1,0	3,936	2,059	4,38
2,0	8,732	4,593	9,84
3,0	13,411	7,741	15,30
4,0	17,858	9,841	20,60
5,0	22,281	11,889	25,80
6,0	25,156	14,259	31,00
8,0	34,377	-	41,30

1.2. Специальная терминология по вопросам радиационной безопасности

Число распадов в секунду в радиоактивном образце называется его ***активностью***. Единицу измерения активности (в системе СИ) называют беккерелем (*Бк*) в честь французского ученого Анри Беккереля, открывшего явление радиоактивности.

$$1\ Бк = 1\ распад/с$$

Кюри (внесистемная единица) - активность препарата данного изотопа, в котором в одну секунду происходит $3{,}7 \cdot 10^{10}$ актов распада.

$$1\ Ки = 3{,}7 \cdot 10^{10}\ Бк$$

Концентрация радиоактивного вещества обычно характеризуется концентрацией его активности. Концентрация активности выражается в единицах активности на единицу веса (удельная активность) или на единицу объема (активная концентрация). Единицы измерения концентрации радиоактивного вещества *Бк/кг* (внесистемная единица *Ки/кг*), *Бк/л* и *Бк/м*^{3} (внесистемные единицы *Ки/л*, *Ки/м*^{3}, *эман*).

$$1\ эман = 1 \cdot 10^{-10}\ Ки/л = 3{,}7\ Бк/л$$

Повреждений, вызванных в живом организме излучением, будет тем больше, чем больше энергии оно передаст тканям. Количество переданной организму энергии называется ***дозой***.

Дозу излучения организм может получить от любого радионуклида или их смеси независимо от того, находятся ли они вне организма или внутри его (в результате попадания с пищей, водой или воздухом).

Дозы можно рассчитывать по-разному, с учетом того, каков размер облученного участка и где он расположен, один ли человек подвергся облучению или группа людей и в течении какого времени это происходило.

Поглощенная доза - количество энергии излучения, поглощенное единицей массы облучаемого тела (тканями организма). Единица измерения в системе СИ - Грей (*Гр*).

$$1\ Гр = 1\ Дж/кг$$

Но эта величина не учитывает того, что при одинаковой поглощенной дозе альфа излучение гораздо опаснее бета- или гамма-излучений. Если принять во внимание этот факт, то дозу следует умножить на коэффициент, отражающий способность излучения данного вида повреждать ткани организма. Альфа-излучение считается при этом в *20 раз* опаснее других видов излучений. Пересчитанную таким образом дозу называют ***эквивалентной дозой***. Ее в системе СИ измеряют в зивертах (*Зв*). Для рентгеновского, гамма- и бета-излучений

$$1\ Зв = 1\ Дж/кг$$

Следует учитывать также, что одни части тела (органы, ткани) более чувствительны, чем другие: например при одинаковой эквивалентной дозе облучения возникновение рака в легких более вероятно, чем в щитовидной железе, а облучение половых желез особенно опасно из-за риска генетических повреждений. Поэтому дозы облучения органов и тканей также следует учитывать с разными коэффициентами (табл. 4). Умножив эквивалентные дозы на соответствующие коэффициенты и просуммировав по всем органам и тканям, получим ***эффективную эквивалентную дозу***, отражающую суммарный эффект облучения для организма. Она также измеряется в зивертах.

Эти три понятия описывают только индивидуально получаемые дозы. Просуммировав индивидуальные эффективные эквивалентные дозы, получен-

ные группой людей, мы получим ***коллективную эффективную эквивалентную дозу***, которая измеряется в человеко-зивертах (*чел·Зв*).

Коэффициенты радиационного риска [7]

таблица 4

Красный костный мозг	0,12
Костная ткань	0,03
Щитовидная железа	0,03
Молочная железа	0,15
Легкие	0,12
Половые железы	0,25
Другие ткани	0,30
Организм в целом	1,00

Соотношение между внесистемными единицами измерения активности и характеристик поля излучения и единицами СИ

таблица 5

Величина	Обозначения и наименования единиц		Связь между единицами
	Внесистемная	Единица СИ	
Активность	*Ки* (кюри)	*Бк* (беккерель)	1 *Ки* = $3{,}7\cdot10^{10}$ c^{-1} = $3{,}7\cdot10^{10}$ *Бк* 1 *Бк* = 1 c^{-1} = $0{,}27\cdot10^{-10}$ *Ки*
Удельная активность	*Ки/кг*	*Бк/кг*	1 *Ки/кг* = $3{,}7\cdot10^{10}$ *Бк/кг* 1 *Бк/кг* = $0{,}27\cdot10^{-10}$ *Ки/кг*
Объемная активность	*Ки/л, эман*	*Бк/м*^{3}	1 *Ки/л* = $3{,}7\cdot10^{13}$ *Бк/м*^{3} 1 *Бк/м*^{3} = $0{,}27\cdot10^{-13}$ *Ки/л* 1 *эман* = $1\cdot10^{-10}$ *Ки/л* = 3,7 *Бк/л*
Поглощенная доза	*рад*	*Гр* (грей)	1 *рад* = 100 *эрг/г* = 0,01 *Гр* 1 *Гр* = 10^4 *эрг/г* =100 *рад*
Мощность поглощенной дозы	*рад/с*	*Гр/с*	1 *рад/с* = 0,01 *Гр/с* 1 *Гр/с* = 100 *рад/с*
Эквивалентная доза	*бэр* (биологический эквивалент *рада*)	*Зв* (зиверт)	1 *бэр* = 1 *рад*/Q* = 0,01 *Гр*/Q = = 0,01 *Зв* 1 *Зв* = 1 *Гр*/Q = 100 *рад*/Q = = 100 *бэр*
Мощность эквивалентной дозы	*бэр/с*	*Зв/с*	1 *бэр/с* = 0,01 *Зв/с* 1 *Зв/с* = 100 *бэр/с*
Экспозиционная доза	*Р* (рентген)	*Кл/кг*	1 *Р* = $2{,}58\cdot10^{-4}$ *Кл/кг* 1 *Р* = $0{,}88\cdot10^{-2}$ *Гр* в воздухе 1 *Кл/кг* = $3{,}88\cdot10^{3}$ *Р*
Мощность экспозиционной дозы	*Р/с*	$\frac{Кл}{кг\cdot с}$	1 *Р/с* = $2{,}58\cdot10^{-4}$ *Кл/кг·с* 1 *Р/с* = $0{,}88\cdot10^{-2}$ *Гр/с* в воздухе 1 *Кл/кг·с* = $3{,}88\cdot10^{3}$ *Р/с*

* - коэффициент качества излучения

1.3. Воздействие ионизирующего излучения на ткани организма

Радиация по самой своей природе вредна для жизни. Малые дозы облучения могут "запустить" не до конца еще установленную цепь событий, приводящих к раку или к генетическим повреждениям. При больших дозах радиация может разрушать клетки, повреждать ткани органов и явиться причиной скорой гибели организма.

Повреждения, вызываемые большими дозами облучения, обыкновенно проявляются в течение нескольких часов или дней. Раковые заболевания, однако, проявляются спустя много лет после облучения - как правило, не ранее, чем через одно-два десятилетия. А врожденные пороки развития и другие наследственные болезни, вызываемые повреждением генетического аппарата, проявляются лишь в следующем или последующих поколениях: это дети, внуки и более отдаленные потомки человека, подвергшегося облучению.

Чтобы вызвать острое поражение организма, дозы облучения должны превышать определенный уровень, но нет никаких оснований считать, что это правило действует в случае таких последствий, как рак или повреждение генетического аппарата. По крайней мере, теоретически для этого достаточно самой малой дозы. Однако в то же самое время никакая доза облучения не приводит к этим последствиям во всех случаях. Даже при относительно больших дозах облучения далеко не все люди обречены на эти болезни: действующие в организме человека репарационные механизмы обычно ликвидируют все повреждения. Точно также любой человек, подвергшийся действию радиации, совсем не обязательно должен заболеть раком или стать носителем наследственных болезней; однако вероятность, или риск**,** наступления таких последствий у него больше, чем у человека, который не был облучен. И риск этот тем больше, чем больше доза облучения.

Механизм воздействия ионизирующего излучения на ткани организма следующий.

Заряженные частицы. Проникающие в ткани организма альфа- и бета-

частицы теряют энергию вследствие электрических взаимодействий с электронами тех атомов, близ которых они проходят. Гамма-излучение и рентгеновские лучи передают свою энергию веществу несколькими способами (фотоэффект, комптон-эффект, эффект образования электрон-позитронных пар), которые в конечном счете также приводят к электрическим взаимодействиям.

Электрические взаимодействия. За время порядка десяти триллионных секунды после того, как проникающее излучение достигнет соответствующего атома в ткани организма, от этого атома отрывается электрон. Последний заряжен отрицательно, поэтому остальная часть исходно нейтрального атома становится положительно заряженной. Этот процесс называется ионизацией. Оторвавшийся электрон может далее ионизировать другие атомы.

Физико-химические изменения. И свободный электрон, и ионизированный атом обычно не могут долго пребывать в таком состоянии и в течении следующих десяти миллиардных долей секунды участвуют в сложной цепи реакций, в результате которых образуются новые молекулы, включая и такие чрезвычайно реакционноспособные, как "свободные радикалы".

Химические изменения. В течение следующих миллионных долей секунды образовавшиеся "свободные радикалы" реагируют как друг с другом, так и с другими молекулами и через цепочку реакций, еще не изученных до конца, могут вызывать химическую модификацию важных в биологическом отношении молекул, необходимых для нормального функционирования клетки.

Биологические эффекты. Биохимические изменения могут произойти как через несколько секунд, так и через десятилетия после облучения и явиться причиной немедленной гибели клеток или таких изменений в них, которые могут привести к раку.

Основную часть облучения население земного шара получает от естественных источников радиации (рис. 1). Большинство из них таковы, что избежать облучения от них совершенно невозможно. На протяжении всей истории существования Земли разные виды излучения падают на поверхность Земли из

космоса и поступают от радиоактивных веществ, находящихся в земной коре, а также полученных человеком в результате его техногенной деятельности.

Человек подвергается облучению двумя способами. Радиоактивные вещества могут находиться вне организма и облучать его снаружи. В этом случае говорят о внешнем облучении. Или же они могут оказаться в воздухе, которым дышит человек, в пище или воде и попасть внутрь организма. Такой способ облучения называют внутренним.

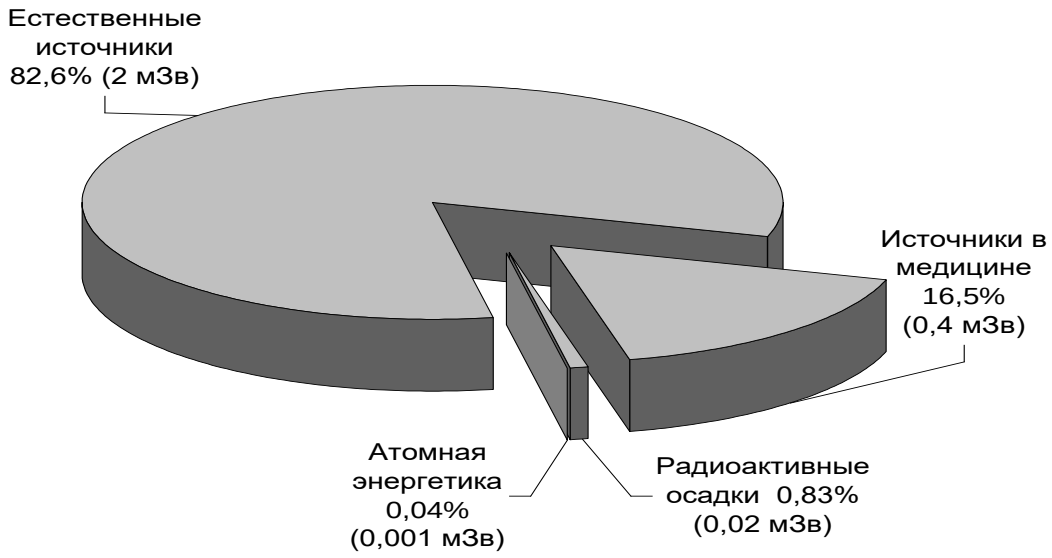


Рис. 1. Источники радиации [7]

Степень радиационного воздействия изотопов, содержащихся в организме человека, определяется создаваемой ими тканевой дозой облучения различных органов и тканей, избирательно накапливающих эти изотопы. Накопление изотопов в организме зависит от скорости их поступления в организм с пищевыми продуктами, водой и воздухом в желудочно-кишечный тракт или легкие, степени усвояемости изотопа из желудочно-кишечного тракта или легких, характера его распределения и времени удержания в организме (табл. 6).

Повреждений, вызванных в живом организме излучением, будет тем больше, чем больше энергии оно передаст тканям (табл. 7).

Биологические и физические константы для некоторых изотопов [5]

Таблица 6

Изотоп	Масса критического органа, *г*	Периоды полураспада и полувыведения, *дни*			Доля изотопа, попадающая в рассматриваемый орган	Доля изотопа, попадающая в рассматриваемый орган при	
		$T_{физ}$	$T_{биол}$	$T_{эфф}$	от общего его количества в организме	заглатывании	вдыхании
-1-	-2-	-3-	-4-	-5-	-6-	-7-	-8-
H^3	все тело, $7*10^4$	$4,5*10^3$	12	12	1,0	0,75	1,0
C^{14}	все тело, $7*10^4$	$2*10^6$	10	10	1,0	1,0	0,75
Na^{24}	все тело, $7*10^4$	0,63	11	0,6	1,0	1,0	0,75
P^{32}	все тело, $7*10^4$	14,3	257	13,5	1,0	0,75	0,63
	кости, $7*10^3$	14,3	1155	14,1	0,21	0,15	0,13
	гол. мозг, $1,5*10^3$	14,3	257	13,5	$7\cdot10^{-3}$	$5,3\cdot10^{-3}$	$4,4\cdot10^{-3}$
K^{42}	все тело, $7*10^4$	0,52	58	0,52	1,0	1,0	0,75
	селезенка, 150	0,52	58	0,52	$4\cdot10^{-3}$	$4\cdot10^{-3}$	$3\cdot10^{-3}$
	гол. мозг, $1,5*10^3$	0,52	58	0,52	0,04	0,04	0,03
	печень, $1,7*10^3$	0,52	58	0,52	0,02	0,02	0,015
Ca^{45}	все тело, $7*10^4$	164	16400	162	1,0	0,6	0,55
	кости, $7*10^3$	164	18000	162	0,9	0,54	0,5
Mn^{56}	все тело, $7*10^4$	0,11	17	0,11	1,0	0,1	0,3
Fe^{55}	все тело, $7*10^4$	1100	800	463	1,0	0,1	0,3
	селезенка, 150	1100	600	388	0,02	0,002	0,006
Fe^{59}	все тело, $7*10^4$	45,1	800	42,7	1,0	0,1	0,3
	селезенка, 150	45,1	600	41,9	0,02	0,002	0,006
Co^{60}	все тело, $7*10^4$	1900	9,5	9,5	1,0	0,3	0,4
	печень, $1,7*10^3$	1900	9,5	9,5	0,02	0,007	0,02
Ni^{65}	все тело, $7*10^4$	0,11	667	0,11	1,0	0,3	0,4
	кости, $7*10^3$	0,11	800	0,11	0,5	0,15	0,2

-1-	-2-	-3-	-4-	-5-	-6-	-7-	-8-
Cu^{64}	все тело, $7*10^4$ печень, $1,7*10^3$ гол. мозг, $1,5*10^3$	0,53 0,53 0,53	80 150 800	0,53 0,53 0,53	1,0 0,08 0,01	0,28 0,02 0,003	0,39 0,03 0,004
Zn^{65}	все тело, $7*10^4$ кости, $7*10^3$ мышцы, $3*10^4$	245 245 245	933 0,001 1959	194 206 218	1,0 0,16 0,34	0,1 0,015 0,03	0,3 0,045 0,09
Sr^{90}	все тело, $7*10^4$ кости, $7*10^3$	10^4 10^4	13000 18000	5700 6400	1,0 0,99	0,3 0,09	0,4 0,12
Y^{90}	все тело, $7*10^4$ кости, $7*10^3$	2,68 2,68	14000 18000	2,68 2,68	1,0 0,75	0,0001 $7,5\cdot10^{-5}$	0,25 0,19
J^{131}	все тело, $7*10^4$ щит. железа., 20	8 8	138 138	7,6 7,6	1,0 0,3	1,0 0,3	0,75 0,23
Cs^{137}	все тело, $7*10^4$ мышцы, $3*10^4$	$1,1*10^4$ $1,1*10^4$	70 140	70 138	1,0 0,79	1,0 0,4	0,75 0,3
Ba^{140}	все тело, $7*10^4$ кости, $7*10^3$	12,8 12,8	65 65	10,7 10,7	1,0 0,7	0,05 0,035	0,28 0,19
Po^{210}	все тело, $7*10^4$ печень, $1,7*10^3$	138,4 138,4	30 41	25 32	1,0 0,22	0,06 0,01	0,28 0,05
Ra^{226}	все тело, $7*10^4$ кости, $7*10^3$	$5,9*10^5$ $5,9*10^5$	8100 16400	900 16000	1,0 0,99	0,3 0,04	0,4 0,03
Th^{232}	все тело, $7*10^4$ кости, $7*10^3$	$5,1*10^{12}$ $5,1*10^{12}$	57000 73000	57000 73000	1,0 0,9	0,0001 $7\cdot10^{-5}$	0,25 0,18
Th^{234}	все тело, $7*10^4$ кости, $7*10^3$	24,1 24,1	57000 73000	24,1 24,1	1,0 0,7	0,0001 $7\cdot10^{-5}$	0,25 0,18
U^{238}	все тело, $7*10^4$ кости, $7*10^3$	$1,6*10^{12}$ $1,6*10^{12}$	100 300	100 300	1,0 0,85	0,0001 $3,3\cdot10^{-5}$	0,25 0,083
U^{235}	все тело, $7*10^4$ кости, $7*10^3$	$2,6*10^{11}$ $2,6*10^{11}$	100 300	100 300	1,0 0,85	0,0001 $3,3\cdot10^{-5}$	0,25 0,083
Pu^{239}	все тело, $7*10^4$ кости, $7*10^3$	$8,9*10^6$ $8,9*10^6$	65000 73000	64000 72000	1,0 0,9	$3\cdot10^{-5}$ $2,4\cdot10^{-5}$	0,25 0,2

Эффективная энергия основных радиоактивных изотопов, передаваемая ткани при каждом акте их распада [5]

Таблица 7

Радиоактивный изотоп	Критический орган	E_{Σ}, *МэВ*
H^{3}	Все тело	0,01
C^{14}	Все тело, жировая ткань Кости	0,054 2,7
Na^{24}	Все тело Легкие	2,7 1,5
P^{32}	Все тело, Кости	0,69 3,5
Co^{60}	Все тело Легкие, печень Селезенка, почки	1,5 0,72 0,56
Zn^{65}	Все тело, мышцы Легкие, печень Почки Кости	0,32 0,15 0,11 0,094
Sr^{90}	Все тело, легкие Кости	0,21 1,1
Y^{90}	Все тело Легкие Кости	0,89 0,87 4,4
J^{131}	Все тело Щитовидная железа	1,6 0,69
Cs^{137}	Все тело, мышцы	0,59
Ba^{140}	Все тело, мышцы Кости	2,3 4,2
Po^{210}	Все тело, легкие, селезенка, почки, печень	55
Ra^{226}	Все тело, кости	110
Th^{232}	Все тело Кости	62 270
U^{235}	Все тело, почки, легкие	46
U^{238}	Все тело, легкие, почки Кости	43 220
Pu^{239}	Все тело, легкие, печень Кости	53 270

1.4. Расчет доз облучения

Тканевую дозу от внешнего γ-излучения радиоактивных изотопов можно определить по величине измеренной ионизации.

Хультквист [10] вывел соотношения для вычисления величины ионизации, создаваемой над поверхностью земли γ-излучением естественных радио-

активных изотопов Ra^{226}, *U, Th* (в случае равновесия с продуктами их распада) и *K*, содержащихся в почве (табл. 8).

Данные по ионизации над поверхностью земли [10]

таблица 8

Изотоп	Ионизация, *пар ионов/см³·с*	
	без учета рассеянного излучения *	с учетом многократного рассеяния γ-квантов
Радий-226	$0{,}6\cdot10^{12}\,C_{Ra}$	$1{,}26\cdot10^{12}\,C_{Ra}$
Природный уран	$0{,}2\cdot10^{6}C_{U}$	$0{,}44\cdot10^{6}C_{U}$
Торий-232	$0{,}104\cdot10^{6}C_{Th}$	$0{,}21\cdot10^{6}C_{Th}$
Калий	$48\cdot C_{K}$	$91\cdot C_{K}$

* C - концентрация радиоактивного изотопа, *г/г* почвы

Ионизация, создаваемая γ-излучением, и мощность дозы P в воздухе (в *Гр/сутки*) связаны между собой следующим соотношением:

$$P = \frac{n\cdot 34\cdot 8{,}64\cdot10^{4}\cdot 1{,}6\cdot10^{12}\cdot 770\cdot 1{,}12}{10^{4}} = 4\cdot10^{-7}\cdot n \qquad (2)$$

где n - число пар ионов, образованных в 1 *см³* за 1 *с*; 34 - величина средней работы ионизации в воздухе для γ-квантов средних энергий, *эВ*; $8{,}64\cdot10^{4}$ - число секунд в сутках; $1{,}6\cdot10^{-12}$ - число эргов в 1 *эВ*; 770 - объем, занимаемый 1 *г* воздуха, *см³*; 1,12 - множитель перехода от поглощенной дозы в воздухе к поглощенной дозе в ткани (для γ-квантов средних энергий одному рентгену соответствует поглощенная в 1 *г* воздуха доза $0{,}88\cdot10^{-2}$ *Гр* , а в 1 *г* мягких тканей - $0{,}98\cdot10^{-2}$ *Гр*).

Используя эту зависимость, Хультквист [10] вывел соотношения, позволяющие определить величину мощности поглощенной дозы на поверхности земли в зависимости от концентрации изотопов Ra^{226}, *U, Th* и *K* (с учетом рассеянного излучения в почве):

$$P = 5 \cdot 10^5 \cdot C_{Ra},$$
$$P = 0{,}176 \cdot C_U,$$
$$P = 8{,}4 \cdot 10^{-2} \cdot C_{Th}, \qquad (3)$$
$$P = 3{,}64 \cdot 10^{-5} \cdot C_K,$$

где C_{Ra}, C_U, C_{Th} и C_K - концентрация радиоактивного изотопа в *г/г* почвы; P - мощность поглощенной дозы в *Гр/сут.*

Для естественных радиоактивных изотопов *Rn* и *Tn* (и продуктов их распада), содержащихся в атмосферном воздухе, при условии их постоянной концентрации по высоте над поверхностью земли мощность поглощенной дозы можно рассчитать, используя соотношения (4), также полученные Хультквистом в предположении, что 60 % аэрозольных частиц, несущих радиоактивность продуктов распада *Rn* и *Tn*, задерживаются в легочной ткани. Объем легких принят 3000 $см^3$, вес 800 *г*:

$$P = 1{,}05 \cdot 10^{-5} \cdot Q_{Rn},$$
$$P = 1{,}03 \cdot 10^{-5} \cdot Q_{Tn}, \qquad (4)$$

где P - мощность поглощенной дозы в *Гр/сут*; Q_{Rn}, Q_{Tn} - концентрация радона и торона в атмосферном воздухе в *Бк/л*.

В атмосфере постоянно находятся естественные радиоактивные изотопы *Rn, Tn* и их дочерние продукты, которые непрерывно поступают в легкие человека с вдыхаемым воздухом; в легочной ткани накапливаются дочерние продукты распада *Rn* и *Tn*.

Дозы облучения легких, обусловленные излучением *Rn* и *Tn* и их дочерних продуктов, находящихся в состоянии радиоактивного равновесия в легких, могут быть вычислены с помощью соотношений [9]:

$$P_{Rn} = 1{,}35 \cdot 10^2 Q_{Rn},$$
$$P_{Tn} = 17{,}97 \cdot 10^2 Q_{Tn}, \qquad (5)$$

где P_{Rn}, P_{Tn} - мощности доз, создаваемых соответственно радоном и тороном в

мЗв/год; Q_{Rn} и Q_{Tn} - концентрации радона и торона в воздухе в *Бк/л*.

Если известны мощность дозы P и время облучения t, то доза от внешнего облучения равна их произведению:

$$D = P\,t \tag{6}$$

Тканевая доза облучения критического органа, в котором отложилась некоторая доля от попавшего в организм радиоактивного изотопа, может быть вычислена по следующему соотношению:

$$D = \frac{C \cdot k \cdot E_{\Sigma} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-6} \cdot t}{M \cdot 10^{4}}\ , \tag{7}$$

где D - доза облучения критического органа в *Гр*; C - активность изотопа, попавшего в организм, в *Бк* или *расп/с*; k - доля изотопа, отложившегося в критическом органе, от его общего количества во всем организме; E_{Σ} - эффективная энергия, передаваемая ткани органа при каждом акте распада радиоактивного изотопа, в *МэВ*; t - время облучения критического органа в *с*; M – масса критического органа, в *г*; $1{,}6 \cdot 10^{-6}$ - число *эргов* в 1 *МэВ*; 10^{4} - число *эрг/г* на 1 *Гр*.

Активность радиоактивного препарата, попавшего в организм, можно рассчитать, если известна его масса :

$$C = \frac{\ln 2 \cdot N_o \cdot m}{T_{1/2} \cdot A}\ , \tag{8}$$

где $N_o = 6{,}02 \cdot 10^{23}$ - число Авогадро; m - масса изотопа в *г*; $T_{1/2}$ - период его полураспада в *с*; A - атомная масса изотопа.

Как видно из соотношения (7), доза в органе, в котором содержится радиоактивный изотоп, зависит от массы облучаемого органа, активности изотопа, содержащейся в этом органе, и энергии испускаемых изотопом частиц и γ-квантов, приходящейся на один распад. На получаемую дозу также будет влиять время пребывания радиоактивного изотопа в органе, которое в свою очередь зависит от периода полураспада радионуклида и периода его полувыведения из органа.

По соотношению (7) можно рассчитывать дозу, если концентрация ра-

диоизотопа в критическом органе практически не меняется во времени (период эффективного полувыведения изотопа очень велик), то есть когда изотоп медленно распадается и выводится.

Если концентрация изотопа в критическом органе во времени ощутимо уменьшается из-за биологического выведения и радиоактивного распада, то через время t после окончания поступления изотопа в орган доза будет равна:

$$D = \frac{C \cdot k \cdot E_{\Sigma} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-6}}{M \cdot 10^{4}} \cdot \frac{(1 - e^{-\lambda \ t})}{\lambda} \ , \qquad (9)$$

где λ - постоянная эффективного выведения ($\lambda = ln\,2/T_{эфф}$) в c^{-1}.

Если доза рассчитывается за достаточно большой промежуток времени, когда практически весь радиоактивный изотоп удалится из организма, то необходимо использовать следующее соотношение:

$$D = \frac{C \cdot k \cdot E_{\Sigma} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-6}}{M \cdot 10^{4}} \quad \frac{1}{\lambda} \ . \qquad (10)$$

1.5. Предельно допустимые уровни облучения

Предельно допустимые дозы внешнего и внутреннего облучения регламентируются Нормами радиационной безопасности (НРБ-99/2009) и приведены в таблице 9.

таблица 9

Нормируемые величины	Дозовые пределы, *мЗв/год*		
	персонал категории А*	персонал категории Б**	население
Эффективная доза	50	12,5	5
Эквивалентная доза в			
1) хрусталике глаза, кроветворных органах, гонадах	150	37,5	15
2) коже, щитовидной железе, костях, легких, печени, почках, мышцах и др.	500	125	50
3) кистях и стопах	500	125	50

* лица, работающие непосредственно с источниками ионизирующих излучений,

** лица, работающие в помещениях, смежных с помещениями, в которых ведутся работы с радиоактивными веществами и источниками ионизирующих излучений, но не занятых непосредственно работой с радиоактивными веществами и источниками ионизирующих излучений.

Для студентов и учащихся в возрасте до 21 года, проходящих обучение с использованием источников ионизирующего излучения, годовые накопленные дозы не должны превышать значений, установленных для населения.

2. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

2.1. Определение предельно допустимого времени пребывания на различных расстояниях от источника гамма-излучения

Задание

а) Предварительно отградуированным радиометром измерить мощность экспозиционной дозы на различных расстояниях от источника гамма-излучения Ra^{226} (3,7 *МБк*).

б) По результатам эксперимента найти предельно допустимое время пребывания на различных расстояниях от источника излучения.

в) Рассчитать теоретически предельно допустимое время пребывания на различных расстояниях от данного источника излучения.

г) Сравнить экспериментальные результаты и теоретические расчеты. Сделать выводы.

Материалы и оборудование

1. Отградуированный радиометр типа СРП-68-01 или СРП-88-01.

2. Радиоизотопный источник Ra^{226} (эталон С-41; 0,1 *мг* Ra; 3,7 *МБк*).

3. Калькулятор, миллиметровка, карандаш, резинка, линейка.

Порядок выполнения работы

а) Радиометр установить в 10-ти положениях на различных расстояниях от источника Ra^{226} и измерить мощность экспозиционной дозы *P*. Расстояние изменять от 0,1 до 1 *м* с шагом 0,1 *м*. Для перемещения источника использовать дистанционный инструмент.

б) Рассчитать предельно допустимое время пребывания на различных расстояниях от источника излучения по формуле:

$$t_{max} = \frac{D_{пр}}{P}, \qquad (11)$$

где $D_{пр}$ - предельно допустимая доза за один рабочий день при пятидневной рабочей неделе (для персонала – 0,2 *мГр*, для населения – 0,02 *мГр*), P - мощность поглощенной дозы в *мГр/ч* (1 *мГр/ч* = $1{,}13 \cdot 10^5$ *мкР/ч*).

Результаты замеров и последующих расчетов занести в таблицу:

Расстояние R, *м*	Мощность дозы P		t_{max}, *ч*	$t_{max}^{теор}$, *ч*
	в *мкР/ч*	в *мГр/ч*		
1	2	3	4	5

в) Теоретически рассчитать предельно допустимое время пребывания на различных расстояниях от источника излучения по формуле:

$$t_{\max}^{теор} = \frac{D_{пр}}{84} \cdot R^2, \qquad (12)$$

где $D_{пр}$ - предельно допустимая доза за один рабочий день при пятидневной рабочей неделе (для персонала – 0,2 *мГр*, для населения – 0,02 *мГр*), 84 – постоянная источника Ra^{226} типа С-41, R – расстояние до источника излучения в *м*.

Результаты теоретических расчетов занести в таблицу.

г) По экспериментальным данным и теоретическим расчетам на одних координатных осях построить графики зависимости $t_{max} = f(R)$ и $t_{\max}^{теор} = f(R)$ для персонала и населения (рис.2).

д) Сделать выводы. Объяснить, почему кривая $t_{max} = f(R)$ лежит ниже теоретически рассчитанной кривой $t_{\max}^{теор} = f(R)$ или почему теоретически рассчитанное время пребывания возле источника больше найденного экспериментально.

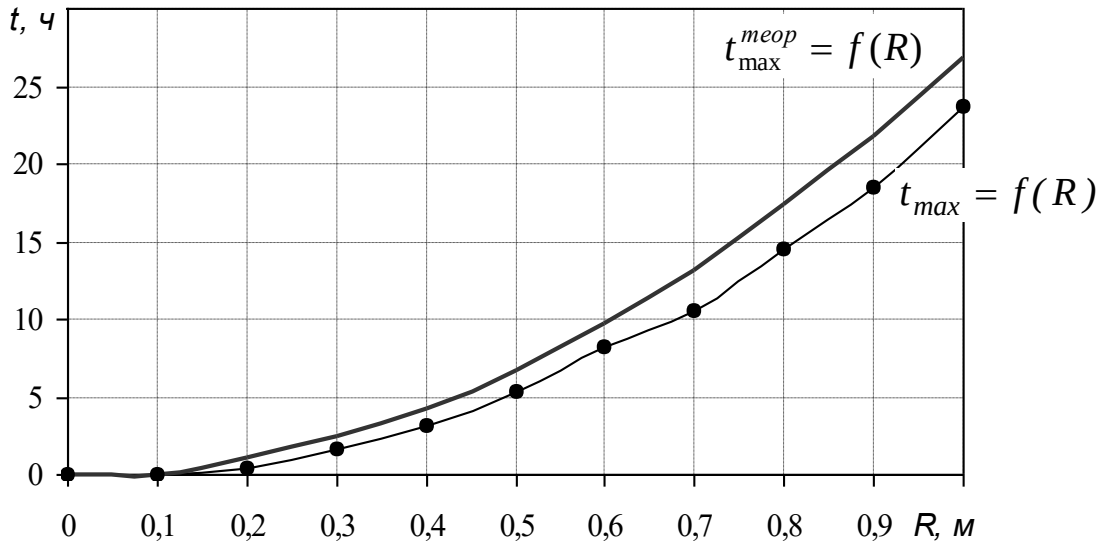


Рис. 2. Образец оформления графиков зависимости $t_{max} = f(R)$ и $t_{\max}^{теор} = f(R)$.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение экспозиционной дозы.

2. Дайте определение поглощенной дозы.

3. Какова связь между *мкР* и *мГр* ?

4. Какова связь между дозой и мощностью дозы ?

5. Как зависит доза от расстояния между источником ионизирующего излучения и детектором ?

6. Как зависит доза от времени пребывания возле источника ?

7. Как влияет рассеянное гамма-излучение источника на дозу внешнего облучения ?

Содержание отчета

1. Краткое изложение основных теоретических положений.

2. Порядок выполнения измерений и расчетов.

3. Результаты измерений и расчетов.

4. Графики зависимости $t_{max} = f(R)$ и $t_{\max}^{теор} = f(R)$ для персонала и населения.

5. Выводы.

2.2. Определение дозы внутреннего облучения при попадании радиоактивного вещества внутрь организма

Задание

а) Познакомиться с основными теоретическими положениями при расчете тканевых доз облучения.

б) По заданному преподавателем варианту условий рассчитать дозу внутреннего облучения от радиоактивного вещества, попавшего внутрь организма, за период, равный времени полного выведения радионуклида из организма. При расчете пользоваться справочными данными табл. 6 и табл. 7.

в) Сделать выводы о последствиях внутреннего облучения всего организма или отдельных органов данным радиоактивным веществом.

г) Варианты условий расчета дозы внутреннего облучения

таблица 10

Вариант задания	Радиоактивный изотоп, попавший внутрь организма	Количество радиоактивного изотопа, г	Орган или ткань организма для расчета дозы
-1-	*-2-*	*-3-*	*-4-*
1	H^3	10^{-6}	все тело
2	C^{14}	10^{-6}	все тело
3	Na^{24}	10^{-9}	все тело
4	P^{32}	10^{-9}	все тело
5	P^{32}	10^{-9}	кости
6	Co^{60}	10^{-9}	все тело
7	Co^{60}	10^{-9}	печень
8	Zn^{65}	10^{-9}	все тело
9	Zn^{65}	10^{-9}	кости
10	Zn^{65}	10^{-9}	мышцы
11	Sr^{90}	10^{-9}	все тело
12	Sr^{90}	10^{-9}	кости
13	Y^{90}	10^{-9}	все тело
14	Y^{90}	10^{-9}	кости
15	J^{131}	10^{-9}	все тело
16	J^{131}	10^{-9}	щитовидная железа
17	Cs^{137}	10^{-9}	все тело
18	Cs^{137}	10^{-9}	мышцы
19	Ba^{140}	10^{-9}	все тело

-1-	-2-	-3-	-4-
20	Ba^{140}	10^{-9}	кости
21	Po^{210}	10^{-9}	все тело
22	Po^{210}	10^{-9}	печень
23	Ra^{226}	10^{-9}	все тело
24	Ra^{226}	10^{-9}	кости
25	Th^{232}	10^{-9}	все тело
26	Th^{232}	10^{-9}	кости
27	U^{235}	10^{-9}	все тело
28	U^{235}	10^{-9}	кости
29	U^{238}	10^{-9}	все тело
30	U^{238}	10^{-9}	кости
31	Pu^{239}	10^{-9}	все тело
32	Pu^{239}	10^{-9}	кости

Материалы и оборудование

1. Справочная информация из табл. 6 и 7 настоящего методического пособия.

2. Калькулятор.

Порядок выполнения работы

а) По формуле (8) рассчитать активность радиоактивного препарата, попавшего в организм.

б) Если изотоп медленно распадается и выводится, и концентрация радиоизотопа в критическом органе или всем теле практически не меняется во времени, то есть когда период эффективного полувыведения изотопа очень велик (см. табл. 6), то при расчете дозы использовать формулу 7. Время t принять равным времени полного выведения радионуклида из организма, то есть $t = T_{эфф}/ln2$

Если концентрация изотопа в критическом органе или всем теле ощутимо уменьшается во времени вследствие биологического выведения и радиоактивного распада, то при расчете дозы использовать формулу 9, также приняв время t равным $T_{эфф}/ln2$.

в) Сделать выводы об опасности либо безопасности рассчитанной дозы и возможных последствиях.

Контрольные вопросы

1. Как влияет период полураспада и атомная масса радионуклида на величину его активности ?

2. Как влияет масса критического органа или ткани человека на величину поглощенной дозы ?

4. Как влияет время пребывания радионуклида в критическом органе или ткани человека на величину поглощенной дозы ?

5. Как влияет энергия частиц, излучаемых радионуклидом, на величину поглощенной дозы ?

6. От чего зависит период эффективного полувыведения радионуклида из организма ?

7. Если период полураспада радионуклида велик, а период его биологического полувыведения из организма мал, то каков будет период эффективного полувыведения радионуклида ? Почему ?

8. Если период полураспада радионуклида мал, а период его биологического полувыведения из организма велик, то каков будет период эффективного полувыведения радионуклида ? Почему ?

Содержание отчета

1. Краткое изложение основных теоретических положений.

2. Порядок выполнения расчетов.

3. Результаты расчетов.

4. Выводы.

2.3. Определение дозы внешнего облучения при работе на территориях с повышенной радиоактивностью

Задание

а) Рассчитать дозу внешнего облучения оператора-радиометриста, выполняющего профильную спектрометрическую гамма-съемку в зоне уран-тори-

евого оруденения (рудное тело выходит на дневную поверхность). Скорость перемещения оператора по профилю – 3 *км/ч*. Время измерений на точке – 2 *мин*. Расстояние между точками измерений – 50 *м*. Исходными данными для расчета считать результаты измерений концентрации урана, тория и калия по профилю (табл. 11).

б) Построить графики распределения по профилю концентрации урана, тория, калия и суммарной мощности поглощенной дозы (рис. 3).

в) Сравнить рассчитанную дозу с дозовым пределом для населения (табл.9). Оценить возможность работы оператора в данных условиях в течение месяца при условии, что рабочий день составляет 8 часов. Дать объяснения.

г) Варианты условий расчета:

таблица 11

№ пикета	Вариант 1			Вариант 2			Вариант 3			Вариант 4		
	C_u, %	C_{Th}, %	C_k, %	C_u, %	C_{Th}, %	C_k, %	C_u, %	C_{Th}, %	C_k, %	C_u, %	C_{Th}, %	C_k, %
1	0,01	0,02	1,28	0,01	0,02	1,69	0,01	0,02	2,07	0,00	0,02	2,07
2	0,01	0,02	1,28	0,01	0,02	1,68	0,01	0,02	2,06	0,01	0,02	2,06
3	0,02	0,02	1,36	0,02	0,01	1,70	0,02	0,04	2,07	0,02	0,04	2,07
4	0,09	0,10	1,4	0,09	0,03	1,90	0,09	0,17	1,90	0,04	0,17	1,90
5	0,40	0,17	1,35	0,4	0,28	2,10	0,15	0,37	2,10	0,07	0,37	1,97
6	0,60	0,27	1,34	0,74	0,46	2,16	0,32	0,63	2,16	0,19	0,63	2,06
7	0,70	0,33	1,30	1,20	0,54	2,40	0,38	0,71	2,40	0,38	0,71	2,14
8	1,20	0,35	1,43	1,39	0,55	2,17	0,29	0,55	2,17	0,61	0,87	2,17
9	1,50	0,37	1,72	1,08	0,45	2,53	0,13	0,37	2,21	0,69	1,13	2,21
10	1,00	0,34	1,80	0,58	0,34	2,19	0,68	0,96	2,19	0,87	1,26	2,29
11	0,50	0,36	1,54	0,50	0,36	2,07	1,00	1,36	2,36	0,99	1,45	2,36
12	0,60	0,57	1,46	0,60	0,35	1,97	0,90	1,53	2,19	0,90	1,35	2,19
13	0,70	0,82	1,42	0,53	0,29	1,83	0,65	1,16	2,07	0,65	1,16	2,07
14	0,90	1,00	1,35	0,39	0,27	1,80	0,47	0,75	2,03	0,47	0,75	2,03
15	0,40	0,50	1,35	0,30	0,20	1,74	0,30	0,48	1,98	0,30	0,48	2,04
16	0,20	0,30	1,32	0,20	0,13	1,67	0,11	0,196	1,90	0,11	0,20	2,02
17	0,10	0,20	1,35	0,10	0,06	1,75	0,05	0,08	1,91	0,07	0,08	1,97
18	0,04	0,08	1,34	0,04	0,03	1,60	0,03	0,03	1,82	0,04	0,03	1,92
19	0,02	0,01	1,35	0,02	0,01	1,64	0,02	0,01	1,94	0,02	0,01	1,99
20	0,01	0,01	1,40	0,01	0,01	1,64	0,01	0,01	1,98	0,01	0,01	2,06

продолжение таблицы 11

№ пикета	Вариант 5			Вариант 6			Вариант 7			Вариант 8		
	C_u, %	C_{Th}, %	C_k, %	C_u, %	C_{Th}, %	C_k, %	C_u, %	C_{Th}, %	C_k, %	C_u, %	C_{Th}, %	C_k, %
1	0,00	0,02	1,79	0,00	0,02	2,14	0,00	0,02	2,14	0,02	0,02	2,05
2	0,04	0,02	1,88	0,03	0,02	2,12	0,02	0,02	2,12	0,02	0,02	2,04
3	0,02	0,04	1,86	0,02	0,04	2,02	0,02	0,00	2,02	0,02	0,01	2,02
4	0,04	0,04	1,90	0,20	0,04	2,02	0,04	0,06	2,02	0,09	0,01	2,02
5	0,07	0,17	1,97	0,27	0,09	2,12	0,07	0,15	2,12	0,39	0,03	2,12
6	0,18	0,45	2,06	0,28	0,10	2,18	0,18	0,22	2,18	0,59	0,08	2,36
7	0,38	0,65	2,20	0,38	0,07	2,29	0,29	0,4	2,29	0,29	0,16	2,29
8	0,29	0,85	2,23	0,52	0,1	2,36	0,52	0,61	2,36	0,92	0,36	2,23
9	0,77	1,08	2,30	0,77	0,53	2,40	0,94	0,98	2,65	1,60	0,64	2,55
10	0,89	1,20	2,35	0,89	0,12	2,35	1,80	1,52	2,85	2,18	0,83	2,96
11	0,30	0,26	2,10	0,64	0,07	2,23	0,87	1,13	2,59	1,10	0,55	2,59
12	0,90	0,15	2,19	0,54	0,15	2,19	0,30	0,57	2,42	0,30	0,11	2,42
13	0,65	0,06	2,13	0,60	0,10	2,13	0,18	0,32	2,37	0,12	0,07	2,37
14	0,14	0,04	2,03	0,39	0,06	2,10	0,28	0,92	2,21	0,07	0,03	2,21
15	0,30	0,04	2,04	0,30	0,04	2,10	0,13	0,36	2,28	0,04	0,07	2,10
16	0,11	0,02	2,02	0,11	0,01	2,11	0,04	0,13	2,11	0,04	0,01	2,00
17	0,02	0,01	2,04	0,03	0,01	2,12	0,03	0,04	2,12	0,03	0,02	1,97
18	0,04	0,03	2,07	0,04	0,01	2,16	0,01	0,02	2,07	0,04	0,01	2,07
19	0,02	0,01	2,12	0,02	0,01	2,12	0,02	0,05	2,12	0,02	0,03	2,05
20	0,01	0,01	2,06	0,01	0,01	2,06	0,01	0,01	2,06	0,01	0,01	2,15

Материалы и оборудование

1. Справочная информация из таблицы 9 настоящего методического пособия.

2. Калькулятор, миллиметровка, карандаш, резинка, линейка.

Порядок выполнения работы

а) Используя соотношения (3) рассчитать мощности поглощенных доз P_U, P_{Th}, P_K на поверхности земли в зависимости от концентрации изотопов *U*, *Th* и *K*. Следует иметь в виду, что в приведенных соотношениях концентрации радиоактивных изотопов C_U, C_{Th} и C_K представлены в *г/г* почвы, а мощности поглощенных доз *P* получают в *Гр/сут.* Чтобы C_U, C_{Th} и C_K подставлять в %, а *P* получать в *Гр/ч*, необходимо правую часть равенств умножить на 10^{-2} (1 % = 10^{-2} *г/г*) и разделить на 24 (1 *сут*. = 24 *ч*.):

$$P_U = 7{,}33 \cdot 10^{-5} \cdot C_U ,$$

$$P_{Th} = 3{,}5 \cdot 10^{-5} \cdot C_{Th}, \qquad (12)$$

$$P_K = 1{,}52 \cdot 10^{-8} \cdot C_K$$

Чтобы мощности поглощенных доз выразить в *мГр/ч.*, следует полученные значения P_U, P_{Th}, P_K умножить на 10^3.

б) Общую мощность поглощенной дозы в *i*-той точке профиля от ионизирующего действия γ-излучений *U* (и продуктов его распада), *Th* (и продуктов его распада) и *K*, содержащихся в почве, находят суммированием:

$$P_{\Sigma i} = P_{Ui} + P_{Thi} + P_{Ki} \ . \qquad (13)$$

Распределения по профилю концентрации урана, тория, калия и суммарной мощности поглощенной дозы вынести на график, образец оформления которого представлен на рис.3.

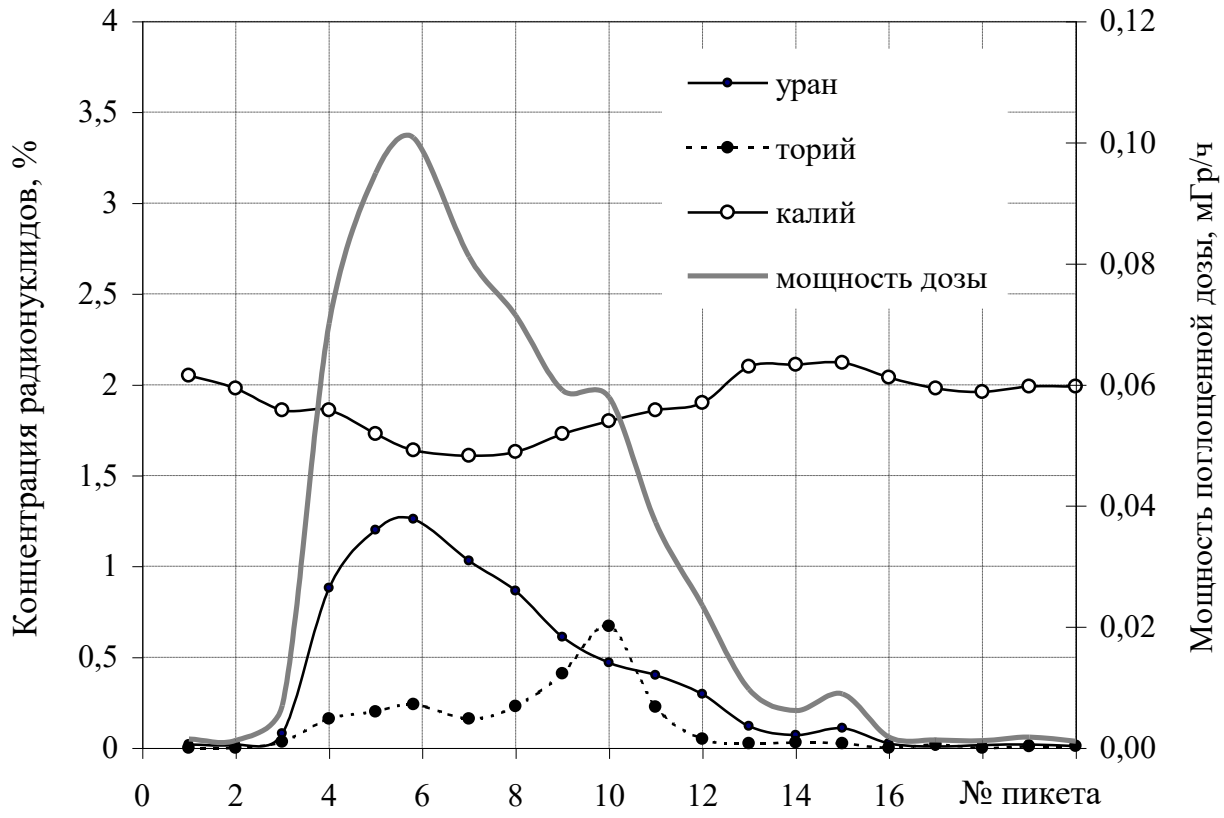


Рис. 3. Образец оформления графиков распределения по профилю концентрации урана, тория, калия и суммарной мощности поглощенной дозы

в) Величину поглощенной дозы находят

$$D = \sum_{i=1}^{n} P_{\Sigma i} \cdot t_i \ , \qquad (14)$$

где $P_{\Sigma i}$ - общая мощность поглощенной дозы в *i*-той точке профиля; t_i - время пребывания в *i*-той точке профиля (с учетом времени перехода от одной точки к другой).

Контрольные вопросы

1. Как связаны между собой величина ионизации, создаваемая γ-излучением, и мощность поглощенной дозы ?

2. Как связаны между собой доза и мощность дозы ?

3. Как оценить возможное время пребывания в условиях повышенного гамма-фона, если известна мощность экспозиционной или поглощенной дозы ?

4. В каких единицах измеряют поглощенную дозу и мощность поглощенной дозы ?

5. Какой из изотопов *U, Th* или *K* вносит наибольший вклад в суммарную мощность поглощенной дозы ? Почему ?

Содержание отчета

1. Краткое изложение основных теоретических положений.

2. Порядок выполнения расчетов.

3. Графики распределения по профилю концентрации урана, тория, калия и суммарной мощности поглощенной дозы.

4. Результаты расчета величины поглощенной дозы оператором-радиометристом.

5. Выводы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Герфорд Л., Кох Х., Хюбнер К.* Практикум по радиоактивности и радиохимии: пер. с нем. – М.: Мир, 1984.

2. *Голубев* В.П. Дозиметрия и защита от ионизирующих излучений - М.: Энергоатомиздат, 1986.

3. *Гусев Н.Г.* Защита от ионизирующих излучений. Том 1. Физические основы защиты от излучений – М.: Энергоатомиздат, 1989.

4. *Краткий справочник инженера-физика..* Ядерная физика. Атомная физика / Под ред. Федорова Н.Д. – М.: Госатомиздат, 1961.

5. *Моисеев А.А., Иванов В.И.* Краткий справочник по радиационной защите и дозиметрии. – М.: Атомиздат, 1964.

6. *Нормы радиационной безопасности* (НРБ-99/2009) – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009.-100 с.

7. *Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности* (ОСПОРБ-99/2010) - М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. – 83 с.

8. *Радиация. Дозы, эффекты, риск*: пер. с англ. – М.: Мир, 1990.

9. *Холл Э. Дж.* Радиация и жизнь: пер. с англ. – М.: Медицина, 1989.

10. *Хультквист Б.* Ионизирующее излучение естественных источников: пер. с англ. – М.: Изд-во иностр. лит., 1959.