

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ПЕРМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «ВНИИ ГАЛУРГИИ»



На правах рукописи

ПРИГАРА АНДРЕЙ МИХАЙЛОВИЧ

**НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗА
УСТОЙЧИВОСТИ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ
ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКЕ СОЛЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

Специальность 1.6.7. Инженерная геология, мерзлотоведение
и грунтоведение

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант
доктор технических наук
Татаркин Алексей Викторович

Пермь – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
Глава 1. ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ СОЛЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ.....	17
1.1 Общие сведения о Верхнекамском месторождении солей.....	18
1.2. Общие сведения о ПТС в аспекте месторождений солей и шахтной сейсморазведки.....	25
1.3 Природно-технические системы «инженерно-геологический массив – подземные сооружения».....	33
1.4 Сценарии развития состояния ПТС «ИГМ – ПС».....	39
Глава 2. ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩИЙ МЕТОД ШАХТНОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ НА ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛНАХ С РАЗДЕЛЕНИЕМ ОТРАЖЕНИЙ.....	48
2.1 Роль геофизических методов при инженерных изысканиях на месторождениях солей	48
2.2 Исследование закономерностей формирования, распространения и регистрации сейсмических волн в условиях полного пространства.	51
2.2.1 О моделировании в сейсморазведке	51
2.2.2 Численное моделирование для различных ИГУ.....	59
2.2.3 Физическое моделирование в реальных условиях	86
2.3 Метод шахтных сейсморазведочных работ ПВРО.....	122
2.3.1 Основы метода шахтной сейсморазведки ПВРО	122
2.3.2 Методика выполнения шахтных полевых работ.	129
2.3.3 Методика обработки данных	143
2.3.4 Оценка достоверности геофизических моделей.....	154
2.4 Выводы по главе	159

Глава 3. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ВЫЯВЛЕНИЕ ОПАСНЫХ ПРОЦЕССОВ	161
3.1 Структурно-тектоническая динамическая модель соляного поднятия в пределах ВКМС	162
3.2 Геолого-геомеханические обоснование природы эрозионных врезов	169
3.3 Технология построения инженерно-геологической модели	173
Глава 4. МЕТОДИКА ПРОГНОЗА ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ВОДОЗАЩИТНОЙ ТОЛЩИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ	184
4.1 Районирование ВКМС по рискам возникновения опасных геологических процессов	184
4.2 Разработка классификации состояния ПТС «инженерно-геологический массив – подземное сооружение» на основе геологических и горнотехнических параметров	194
4.3 Оценка физического состояния ПТС с учетом геолого-геофизических признаков	199
4.4 Методика оценки инженерно-геологических условий водозащитной толщи	217
Глава 5. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗА СОСТОЯНИЯ ГИДРОИЗОЛИРУЮЩИХ ЦЕЛИКОВ	220
5.1 Модели гидроизолирующих целиков во взаимодействии с рассолами	220
5.2 Моделирование распространения упругих колебаний в целиках	227

5.3 Оценка и прогноз состояния гидроизолирующих целиков	239
ОБОБЩЕНИЕ И РЕКОМЕНДАЦИИ	262
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	270
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	273
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	275
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Справки и акты внедрения результатов диссертационного исследования от производственных, проектных, научных и образовательных организаций	315

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Устойчивость природно-технических систем (ПТС), включающих подземные сооружения (горные выработки) и взаимодействующий с ними инженерно-геологический массив соляного месторождения, определяется комплексом инженерно-геологических условий, процессов, и параметров сооружений. При определённом сочетании природных и техногенных факторов в геологической среде соляных месторождений происходят опасные инженерно-геологические процессы, приводящие к авариям. Всего в мире потеряно более 80 соляных рудников, два из которых – на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей (ВКМС).

Обоснованием и формированием подходов к оценке и прогнозу инженерно-геологических условий, включая опасные процессы и вопросы формирования природно-технических систем, занимались такие ученые, как Абатурова И. В. (2014, 2020), Аникеев А. В. (1991, 2017), Антоновская Г.Н. (2005-2025), Аптуков В.Н. (2019), Батракова Г. М. (2019), Болтыров В. Б. (2016), Бондарик Г. К. (1981, 2018), Великин С. А (2020), Вязкова О.Е. (1992-2024), Газизов М. С. (1968), Галкин В. И. (2017), Голодковская Г. А. (1968), Дроздов Д.С. (1985-2025), Елкин В. А. (2018), Елохина С. Н. (2013), Еманов А.Ф. (2025), Ефремов В. Н. (1995-2025), Житинская О. М. (2024), Золотарев Г. С (1983), Исаев С. В. (2016), Караваева Т. И. (2015), Коваленко В. Г. (2008), Королев В. Ю. (2007), Красильников П. А. (2020, 2024), Крашенинников В. С. (2017), Кутепов В. М. (2011), Латыпов А. И. (2024), Максимович Н. Г. (2015), Мартюшков К. С. (2013), Меньшикова Е. А. (2022), Назаров Н. Н. (1996), Оленченко В.В. (2004-2025), Олянский Ю. И. (2019, 2023), Осовецкий Б. М. (1990), Патрушев Ю. В. (2017), Середин В. В. (1985, 2017), Строкова Л. А. (2011), Тагильцев С.Н. (1982-2025), Уткин М. М. (2019), Феллер Е. Н. (2014), Фоменко, И. К. (1999-2025), Хоменко В. П. (2004), Шигаев В. Ю. (1991-2025) и др.

Изучением геологических условий при разработке месторождений полезных ископаемых методами сейсморазведки занимались такие исследователи как Тархов А.Г., Бондаренко В.М., Коваленко В.Ф. (1973, 1977), Акишев. Т.А., Случанко В.Г., Сокол И.Т. (1974), Бродовой В.В. (1974, 1979, 1984), Голубев А.А., Рабинович Г.Я. (1976), Орешко М.С., Рудковский Р.Р., Гришко А.И. (1978), Боровко Н.Н. (1979), Горяинов Н.Н. (1979, 1992), Gendzwill D.J., Randy Brehm (1993), Вагин В.Б. (2010), Данильев С. М. (2011, 2024), Кулагов ЕВ. (2014, 2024),

Кашников Ю.А. (2021), Писецкий В.Б. (2012-2025), Путилов И.С. (2016), Рыжков В.И. (1995-2025), Сенин Л.Н. (2009), Спасский Б.А. (1992-2010), Бабкин А.И., Санфиоров И.А., Ярославцев А.Г. (1996-2025), Жуков А.А., Царев Р.И. (2018-2025), и др. В частности, Бабкиным А.И. и Санфиоровым И.А. (2003), Жуковым А.А., Царевым Р.И. (2019), использован метод шахтной сейсморазведки, что позволило получить сведения об особенностях геологического строения водозащитной толщи (ВЗТ) ВКМС. Для условий ВКМС Э.Х. Вишняковым (1986, 1989, 1990), В.М. Новоселицким (1987), С.В. Глебовым (2006) выполнены исследования по анализу, обобщению, и выработке рациональных геофизических комплексов.

Несмотря на широкое освещение рассматриваемой проблемы в научной печати, на соляных рудниках продолжают происходить аварии, в результате которых утрачиваются гигантские комплексы подземных сооружений и технических средств, а также значительные запасы калийно-магниевых и натриевых солей. Данный факт доказывает, что существующие нормативные требования, несмотря на строгое их исполнение недропользователями, не позволяют с достаточной точностью прогнозировать активизацию опасных геологических процессов. Причиной является недостаточная детальность инженерно-геологических моделей и эффективность существующих систем оценки и мониторинга состояния горных массивов. В связи с этим, актуальной является разработка научно-методических основ инженерно-геологической оценки и прогноза устойчивости ПТС на базе высокоразрешающих геофизических методов, в частности шахтной сейсморазведки, позволяющей получать детальную информацию о строении и свойствах геологической среды.

Основные понятия и терминология. В настоящей работе объектом исследования выступает *природно-техническая система* – по определению Г.К. Бондарика, это целостная, упорядоченная в пространственно-временном отношении совокупность компонентов, включающая орудия, продукты и средства труда, естественные и искусственно изменённые природные тела, а также естественные и искусственные поля, взаимодействующие друг с другом и объединённые общностью выполняемой функции – повышения безопасности эксплуатации соляного месторождения. ПТС является ключевым понятием инженерной геологии и представляет собой организованную, открытую, динамическую и управляемую систему, пространственной границей которой в

литосфере служит зона влияния технического объекта.

Среди естественных и искусственных тел можно выделить базовые элементы, обеспечивающие устойчивость ПТС в вертикальной плоскости – водозащитная толща (ВЗТ), и в горизонтальной плоскости – геотехнические массивы с заданными прочностными, деформационными и гидроизолирующими свойствами, или гидроизолирующие целики. К техническим объектам, относятся подземные сооружения (горные выработки) различного назначения – капитальные, подготовительные, очистные.

Устойчивость ПТС определяется её способностью сохранять работоспособность технических объектов при изменениях геологической среды, не выходящих за пределы области допустимых изменений. Количественными критериями области допустимых изменений в работе приняты: состав, строение и мощность водозащитной толщи, состояние гидроизолирующих целиков, характеризующееся степенью нагружения, пределом прочности на сжатие, выходом сейсмических атрибутов за пределы 2σ . Методологическую основу работы составляет комплексный подход, в рамках которого инженерная геология задает объект исследования (ПТС), систему понятий, и теоретическую базу для оценки геологических процессов и свойств грунтов, а геофизические методы (шахтная сейсморазведка) выступают как инструмент для получения исходных данных о строении и свойствах геологической среды.

Цель работы: разработка научно-методических основ инженерно-геологической оценки и прогноза устойчивости природно-технических систем для повышения безопасности строительства и эксплуатации подземных сооружений при разработке соляных месторождений.

Объект исследований: природно-технические системы, включающие в себя литосферный блок в виде инженерно-геологического массива соляного месторождения, и взаимодействующие с ним подземные сооружения.

Предмет исследований: закономерности формирования инженерно-геологических условий соляных месторождений, условия устойчивости ПТС, определяющие безопасность сооружений при подземной разработке соляных месторождений.

Идея работы: оценка и прогноз устойчивости ПТС при подземной разработке соляных месторождений на основе выявления закономерностей строения и свойств инженерно-геологического массива с использованием

высокоразрешающей шахтной сейсморазведки, позволяющей получать детальную информацию о структурных и физико-механических характеристиках геологической среды.

Основные задачи исследований:

1. Оценка особенностей геологической среды соляных месторождений, выявление сочетания природных и техногенных факторов, приводящих к активизации опасных инженерно-геологических процессов.
2. Создание программно-алгоритмического комплекса для численного моделирования и обработки волновых полей, выполнение численного моделирования и натурных экспериментов для выявления закономерностей распространения упругих волн в условиях полного пространства.
3. Формирование методики шахтных полевых сейсморазведочных работ, обеспечивающей надежную фиксацию сейсмического отклика от целевых элементов инженерно-геологического массива.
4. Разработка высокоразрешающего метода шахтной сейсморазведки для оперативного получения детальных структурных, тектонических и физико-механических характеристик массивов горных пород, взаимодействующих с подземными сооружениями.
5. Получение новых сведений об инженерно-геологических условиях, влияющих на состояние природно-технических систем соляных месторождений.
6. Комплексный анализ условий и закономерностей, сопутствующих опасным инженерно-геологическим процессам в пределах рассматриваемых ПТС, формирование подхода к формализованному определению показателя их наличия.
7. Формирование инженерно-геологических моделей ПТС с учетом геологического строения, геоморфологических признаков и тектонической структуры соляных массивов.
8. Разработка методики выявления изменений в структурных характеристиках геологического разреза и распределении литологических свойств в вертикальной плоскости для анализа инженерно-геологического состояния и прогноза гидрогеологических свойств водозащитной толщи.
9. Создание системы детального сейсмического мониторинга

геометрических и инженерно-геологических свойств массивов горных пород между подземными сооружениями для анализа и прогноза состояния геотехнических массивов с заданными прочностными, деформационными и гидроизолирующими свойствами (гидроизолирующих целиков).

10. Апробация и внедрение результатов исследований.

Методы исследований и фактический материал. Методологическую основу работы составляет комплексный подход, в рамках которого объект исследования (природно-техническая система) рассматривается с позиций инженерной геологии, а инструментом получения исходных данных служат геофизические методы. Данный подход интегрирует в себе:

- инженерно-геологическое районирование и прогнозирование – для оценки риска возникновения опасных геологических процессов и обоснования предельных значений параметров устойчивости ПТС;
- грунтоведческие методы – для изучения состава, состояния и свойств соляных пород (по данным бурения и геофизических исследований);
- геофизические методы (шахтную сейсморазведку) – как инструмент получения детальной информации о структурных и физико-механических характеристиках геологической среды.

Для решения поставленных задач использованы:

- численное моделирование волновых полей (программы Ansys, Tesseral, FS);
- физическое (натурное) моделирование с различными методиками полевых работ;
- статистический анализ и районирование по комплексу геолого-геофизических признаков;
- аналитические и корреляционные методы для перехода от упругих параметров к прочностным и деформационным характеристикам.

В качестве фактического материала использованы результаты опытных и научно-исследовательских работ, выполненных при непосредственном участии автора в течение 28 лет в Горном институте Уральского отделения РАН, Пермском государственном университете (ныне ФГАОУ ВО «ПГНИУ»), ООО НИПППД «Недра», ООО «ППИ-Геофизика» и АО «ВНИИ Галургии».

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Создан и научно обоснован новый метод инженерно-геологических

исследований - шахтная сейсморазведка на поперечных волнах с разделением отражений (ПВРО), базирующийся на выявленных закономерностях распространения упругих волн в условиях полного пространства. Метод включает согласованные методики полевых работ и камеральной обработки, обеспечивающие выделение отражений от геологических границ с разрешающей способностью до 1–2 м, и позволяет оперативно получать детальные структурные, тектонические и физико-механические характеристики массивов горных пород, взаимодействующих с подземными сооружениями.

2. Разработаны инженерно-геологические модели природно-технических систем соляных месторождений, основанные на трёхстадийной технологии построения: по данным бурения, с привлечением данных горных выработок и с использованием метода шахтной сейсморазведки ПВРО. Модели учитывают геологическое строение, геоморфологические признаки и выделяют структурные элементы по различиям в упругих свойствах горных пород, что позволило выявить и включить в модели ранее неизвестные для Верхнекамского месторождения каньонообразные эрозионные врезы, и уточнить морфологию инверсионного рельефа.

3. Установлены закономерности распределения инженерно-геологических характеристик разреза – наличия гипсово-глинистой шляпы, угла падения крыльев поднятия, мощности ритмопачек и покрывающей каменной соли, расстояния от оси поднятия, и их связь с риском возникновения опасных геологических процессов в водозащитной толще. С учетом выявленных закономерностей выполнено районирование территории по риску наличия эрозионных врезов и инверсионного рельефа, а также сформирована классификация состояний природно-технической системы по комплексу геолого-геофизических признаков. На этой основе создана формализованная методика анализа инженерно-геологического состояния и прогноза гидрогеологических свойств ВЗТ для повышения безопасности эксплуатации подземных сооружений.

4. Разработана методика детального сейсмического анализа и мониторинга состояния геотехнических массивов с заданными прочностными, деформационными и гидроизолирующими характеристиками (гидроизолирующих целиков) на основе адаптированного для горизонтальной

плоскости метода шахтной сейсморазведки ПВРО с регистрацией продольных и поперечных волн. Методика обеспечивает оценку, мониторинг и прогноз состояния целиков по комплексу характеристик: ширина, упругие константы (коэффициента Пуассона, модулей упругости и сдвига), предел прочности на сжатие и степень нагружения.

Научная новизна:

1. Впервые применительно к соляным месторождениям разработаны научно-методические основы инженерно-геологической оценки и прогноза устойчивости природно-технических систем при подземной разработке соляных месторождений на базе бурения, горнопроходческих работ и высокоразрешающей шахтной сейсморазведки.

2. Сформированы алгоритмы численного моделирования и обработки волновых полей в условиях полного пространства, установлены закономерности распространения упругих волн, определяющие выбор параметров метода ПВРО.

3. Разработан и научно обоснован новый высокоразрешающий метод шахтной сейсморазведки на поперечных волнах с разделением отражений (ПВРО). Новизна метода ПВРО заключается в: 1 – обосновании оптимальной ориентации источника и приёмников – перпендикулярно плоскости исследований, для регистрации отражённых поперечных волн в условиях полного пространства; 2 – разработке двухлинейной системы возбуждения для разделения отражений из верхнего и нижнего полупространств; 3 – создании математического аппарата и алгоритмов обработки для подавления интерференции отражений из разных полупространств; 4 – достижении детальности 1–2 м, недостижимой стандартными методами шахтной сейсморазведки.

4. Получены новые сведения об инженерно-геологических условиях соляных месторождений: впервые выявлены каньонообразные эрозионные врезы на ВКМС, установлены критерии их идентификации, создана динамическая модель их возникновения.

5. Разработаны инженерно-геологические модели природно-технических систем, учитывающие геологическое строение, геоморфологические признаки и тектоническую структуру горных массивов с выделением структурных элементов по различиям в упругих свойствах пород.

6. Установлены количественные закономерности влияния структурных параметров (наличие поднятия, мощность ритмопачек и покровной каменной соли, угол падения, расстояние от оси поднятия) на риск возникновения опасных процессов, что позволило создать формализованную методику оценки характеристик геологического разреза в вертикальной плоскости, позволяющую выполнять анализ инженерно-геологического состояния и прогноз гидрогеологических свойств водозащитной толщи.

7. Создана технология анализа и прогноза состояния геотехнических массивов с заданными прочностными, деформационными и гидроизолирующими свойствами (гидроизолирующих целиков), основанная на мониторинге геометрических и инженерно-геологических характеристик массивов горных пород между подземными сооружениями с использованием метода ПВРО в горизонтальной плоскости.

Практическая значимость. Разработанные научно-методические основы и базирующиеся на них методики позволяют выполнять оценку и прогноз устойчивости природно-технических систем с целью повышения безопасности строительства и эксплуатации подземных сооружений при подземной разработке соляных месторождений. Основные практические результаты:

- создан и внедрён в производственный процесс метод шахтной сейсморазведки ПВРО (патент на изобретение РФ), обеспечивающий детальное изучение геологического строения водозащитной толщи и состояния гидроизолирующих целиков с разрешающей способностью до 1–2 м;

- разработанное программное обеспечение (12 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ) используется при обработке и интерпретации данных шахтной сейсморазведки, численном моделировании и районировании;

- полученные новые геологические сведения (эрозионные врезы, характеристики внутрисоляных деформаций, зон замещения и инверсионного рельефа, уточнённая структура водозащитной толщи) учтены при построении инженерно-геологических моделей участков ВКМС, проектировании горных работ, разведке и доразведке месторождения, а также при разработке проектов ликвидации участков шахтных полей;

- разработанные методики и классификации состояний ПТС позволяют обоснованно выделять участки с недопустимым риском активизации опасных

процессов и своевременно корректировать проектные решения, что предотвращает потери запасов полезных ископаемых (в ценах 2026 года суммы потерь на двух затопленных ранее рудниках составляют порядка 300 миллиардов рублей без учета потерь запасов), снижает затраты на геологоразведочные работы (производительность полевых сейсморазведочных работ выше в 2,6 раза) и повышает безопасность горных работ.

Результаты исследований рекомендованы к использованию при проектировании, строительстве и эксплуатации подземных сооружений на соляных месторождениях, а также для совершенствования нормативно-технической документации в части инженерно-геологических изысканий и мониторинга ПТС на соляных месторождениях.

Достоверность исследований подтверждена сопоставлением результатов теоретических и натурных экспериментов, заверкой итогов оценки и прогноза ИГУ контрольным бурением и маркшейдерскими наблюдениями на промышленных объектах, в том числе при изучении участков утраты целостности водозащитной толщи и гидроизолирующих целиков, результатами исследований других научных организаций.

Апробация и реализация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались автором на следующих научных конференциях: VII Всероссийское научное солевое совещание (Пермь, 2025), научно-практические конференции и выставки «Инженерная и рудная геофизика» (2024, 2023 гг.), «Неделя горняка – 2022» (Москва, 2022), Mechanics and Rock Engeneering (IOP Conf. Series, 2021), международные научно-практические конференции EAGE «Инженерная и рудная геофизика» (2021, 2020, 2019, 2018, 2010, 2006, 2004 гг.), международная научно-практическая конференция, приуроченная к 90-летию со дня основания института «Уралмеханобр» (Екатеринбург, 2019), VI Всероссийский научно-практический семинар «Современные методы поисков в рудной и нефтяной геологоразведке» имени Г.С. Вахромеева (Иркутск, 2019), международные научно-практические конференции «Теория и практика разведочной и промысловой геофизики» (2015, 2014), региональные научно-практические конференции «Геология и полезные ископаемые Западного Урала» (2012, 2011, 2009, 2002, 2001 гг.), Пятая международная научно-практическая геолого-геофизическая конференция-конкурс молодых ученых и специалистов (Санкт-Петербург, 2005), межрегиональная научно-практическая конференция

«Проблемы и задачи инженерно-строительных изысканий» (Пермь, 2005), Уральские молодежные школы по геофизике УрО РАН (2002, 2001 гг.), международная научно-практическая конференция EAGE «Геомодель-2001» (Москва, 2001), международная конференция «Проблемы формирования и комплексного освоения месторождения солей» (Соликамск, 2000), региональная научная конференция «Геология Западного Урала на пороге 21 века» (Пермь, 1999), международные конференции «Горные науки на рубеже 21 века» (1998, 1997 гг.), научные сессии Горного института УрО РАН (Пермь, 1998–2007).

Личный вклад автора. Все описанные в работе результаты теоретических расчетов, опытных и производственных работ, патенты на изобретения, программное обеспечение разработаны и получены при непосредственном участии автора. Основные научные положения сформулированы и обоснованы лично автором.

Публикации. В период с 1997 по 2025 г. по теме диссертации опубликовано 70 работ, 23 из которых в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией, 19 в изданиях, цитируемых в международной базе Scopus (суммарное количество работ ВАК и Scopus – 36), 12 в изданиях, индексируемых в РИНЦ, 4 работы представлены патентами на изобретение, 12 работ являются авторскими свидетельствами на программы для ЭВМ, издана одна монография.

Объем и структура работы. Текст диссертационной работы изложен на 322 страницах машинописного текста, и состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы из 324 источников, содержит 129 рисунков и 8 таблиц.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность д.т.н. Татаркину А.В., д.т.н. профессору Середину В.В., д.т.н., профессору Костицину В.И., д.т.н., профессору Аптукову В.Н., д.т.н., профессору Кашникову Ю.А., д.г.-м.н., профессору Путилову И.С., д.ф.-м.н., профессору Владову М. Л., д.г.-м.н., профессору Титову К.В., д.т.н., профессору Тагильцеву С.Н., д.г.-м.н., профессору Абатуровой И.В., д.т.н., доценту Жабко А.В., д.г.-м.н., профессору Писецкому В.Б., д.т.н., профессору Зотееву О.В., д.т.н., профессору Семячкову А.И., д.т.н., профессору Хохрякову А.В., д.т.н., профессору Валиеву Ниязу Гадым-оглы, д.г.-м.н., профессору Гуман О.М. за плодотворные консультации и обсуждение, своим многочисленным учителям, наставникам и коллегам-

геофизикам за ценные советы и помощь в практической реализации разработок, руководителям АО «ВНИИ Галургии» к.т.н. Шкуратскому Д.Н., Скопинову М.В. и заведующему лабораторией геофизики к.т.н. Жукову А.А. за создание творческой атмосферы в коллективе и всестороннюю поддержку автора, коллегам геологам и геофизикам АО «ВНИИ Галургии» за совместный всесторонний анализ получаемых геофизических данных, к.г.-м.н. Бричевой С. С. за организацию и проведение плодотворных семинаров на базе МГУ.

Глава 1. ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ СОЛЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

В мире существует большое количество горнопромышленных территорий, при этом их специфика определяется видом добываемых полезных ископаемых и характером их залегания. Для всех таких территорий характерна острая потребность в объективной информации об инженерно-геологических условиях и опасных процессах, требующейся для разработки и безопасной реализации проектов строительства и эксплуатации наземных и подземных сооружений [1 – 6, 9, 26, 27, 39–47, 54, 59, 91, 108, 117, 123, 135, 144–147, 159–161, 164–165, 173, 193–194, 299].

Существенную долю горнопромышленных территорий составляют области, связанные с месторождениями ископаемых солей, являющихся сырьем для производства удобрений, соды, цветных металлов, и других видов продукции [28, 71, 84, 150, 309]. На указанных месторождениях подземные сооружения занимают пространства объемом в десятки миллионов кубических метров, и оказывают существенное влияние на состояние наземных гражданских и промышленных сооружений, и в целом природно-технических систем, угрожая возникновением провалов на земной поверхности вследствие активизации карста [10–13].

Природно-техногенные процессы на месторождениях солей привели и продолжают приводить к разрушительным инженерно-геологическим процессам, в результате которых утрачиваются значительные запасы калийно-магниевых и натриевых солей, а также масштабные комплексы подземных сооружений и технических средств. Таких аварий в мире насчитывается более 80, две из которых произошли на территории ВКМС [22, 23, 314], при этом их причины в большинстве случаев устанавливались уже постфактум, поскольку не существовало методик, позволяющих оперативно получить сведения и выполнять мониторинг состояния массивов горных пород [104, 105].

Так, ретроспективный анализ по открытым источникам указывает, что только на Верхнекамском месторождении потери от двух рудников составляют

сотни миллиардов рублей (в ценах 2026 года). Существуют различные точки зрения на причины данных аварий, но очевидно, что при наличии у недропользователя объективной и своевременной информации о потенциальных угрозах, эти угрозы можно было бы снизить или нейтрализовать.

Таким образом, объективно существует необходимость оценки сочетания природных и техногенных факторов, при которых происходят разрушительные инженерно-геологические процессы, характерные для месторождений данного вида, а также необходимость формирования инженерно-геологических моделей для них и разработки системы эффективной оценки и мониторинга состояния горных массивов.

В этой связи, в данной работе будут рассмотрены ПТС «инженерно-геологический массив – подземные сооружения», характерные для месторождений солей, на примере одного из крупнейших в мире Верхнекамского месторождения солей. ВКМС является характерным примером, на котором проявляются все основные особенности и проблемы отработки месторождений водорастворимых руд [24]. На его территории расположено восемь крупных соляных рудников, работоспособность которых напрямую зависит от объективности информации об инженерно-геологических условиях, в которых выполняется строительство и эксплуатация подземных сооружений.

1.1 Общие сведения о Верхнекамском месторождении солей

Геологические запасы ВКМС месторождения очень велики и оцениваются по карналлитовой породе в 96 млрд. т, по сильвинитам в 113 млрд. т, по каменной соли в 4,7 трлн. т. В тектоническом отношении ВКМС приурочено к Соликамской впадине Предуральского краевого прогиба. Соляная толща месторождения, имеющая форму линзы площадью около 8,2 тыс. км², прослеживается в меридиональном направлении на 206 км, в широтном — до 56 км (рисунок 1) [83, 150, 231]. Внутри контура соляной толщи расположена многопластовая залежь калийно-магниевых солей

протяженностью 140 км при ширине до 41 км. Площадь основной части калийной залежи по внешнему контуру составляет 3,7 тыс. км².

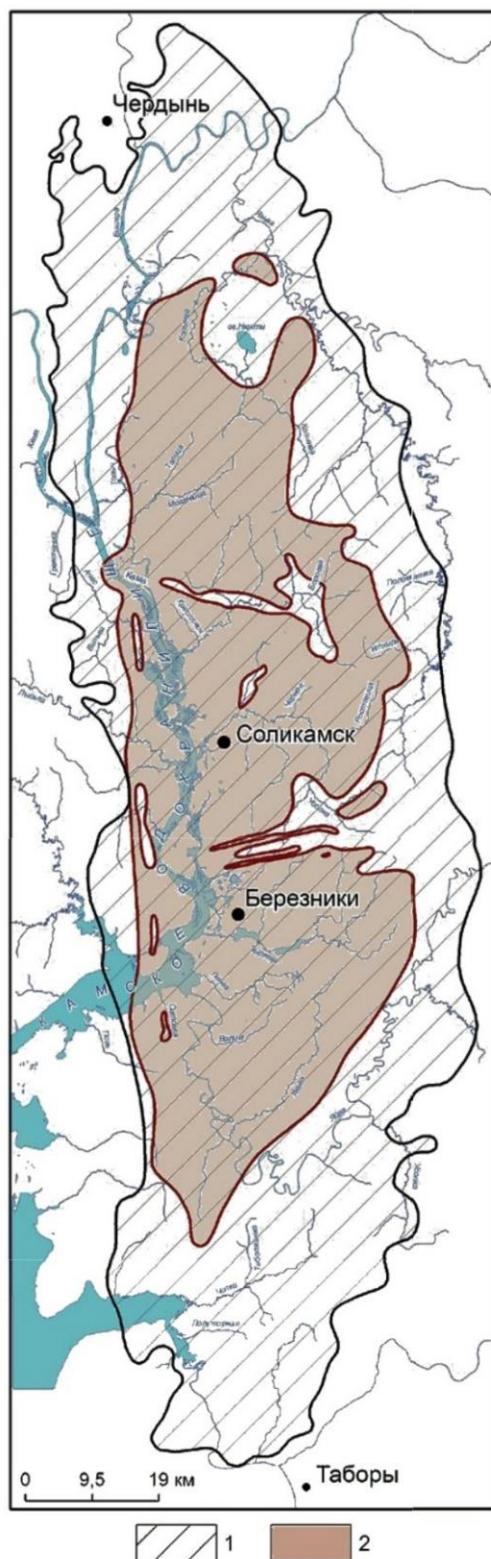


Рисунок 1 – Площадь распространения ВКМС (1 – контур соляной залежи; 2 – залежь калийно-магниевых солей) (по данным [150])

Одним из основных условий устойчивости природно-технических систем и безопасного ведения строительства и эксплуатации сооружений при подземной разработке соляных месторождений, в том числе Верхнекамского и месторождения солей, является обеспечение целостности водозащитной толщи (ВЗТ), под которой на ВКМС понимается безводная и водонепроницаемая часть геологического разреза, расположенная между кровлей верхнего отрабатываемого пласта калийно-магниевых солей и кровлей верхнего слоя каменной соли (рисунок 2).

В составе ВЗТ на ВКМС выделяются три части: нижняя (ВЗТ1) представлена чередованием пластов калийно-магниевых солей и каменной соли; средняя (ВЗТ2) сложена ПКС; верхняя (ВЗТ3) представлена переходной пачкой. Наличие в геологическом разрезе ВЗТ1, ВЗТ2 и ВЗТ3 является классификационным признаком строения ВЗТ, позволяющим выделить полный (ВЗТ1+ВЗТ2+ВЗТ3), переходный (ВЗТ1+ВЗТ2+0) и неполный типы разрезов (ВЗТ1+0+0) [172].

а

Свита, подсвита	Толща	Пачка	Литология	Средняя мощность, м
Нижне-ликамская подсвита P_{1sl_1}	Соляно-мергельная (СМТ)			80
Березниковская свита P_{1br}	Соляная	ПП		20
		ПКС		20
		КП		54
		СП		17,5
		ПДКС		25
	Глинисто-ангидритовая (ГАТ)			330
				230
Карнауховская свита P_{1kr}				100

б

Пачка	Индекс пласта	Литология	Средняя мощность, м
Карналлитовая	К		0,8
	И-К		6,1
	И		1,3
	З-И		2,2
	З		0,6
	Ж-З		3,2
	Ж		0,8
	Е-Ж		4,2
	Е		7,6
	Д-Е		3,4
	Д		8,3
	Г-Д		2,9
	Г		6,3
	В-Г		2,2
	В		5,8
Сильвинитовая	Б-В		1,6
	Б		1,8
	А		1,4
	А-КрI		2,0
	КрI		1,0
	КрI-КрII		1,4
	КрII		4,0
	КрII-КрIII ^а		1,8
	КрIII ^а		0,9
	КрIII ^а -КрIII ^б		0,8
	КрIII ^б		1,1
	КрIII ^б -КрIII ^в		1,6
	КрIII ^в		0,7

-  - глина
-  - мергель
-  - каменная соль
-  - карналлитовая порода
-  - красный сильвинит
-  - аргиллит

-  - доломит
-  - известняк
-  - ангидрит
-  - пестрый сильвинит
-  - полосчатый сильвинит
-  - интервал отработки

Рисунок 2 – Стратиграфический разрез галогенной формации Соликамской впадины (а) и литолого-стратиграфический разрез калийной залежи (б) (по данным [150])

Соляная толща Верхнекамского месторождения при в общем *относительно* простых в тектоническом плане строении и инженерно-геологических условиях (ИГУ), характеризуется развитием в ВЗТ сложных внутрисоляных деформаций (ВСД) различной интенсивности, играющих важную роль в безопасной эксплуатации рудников (рисунок 3).

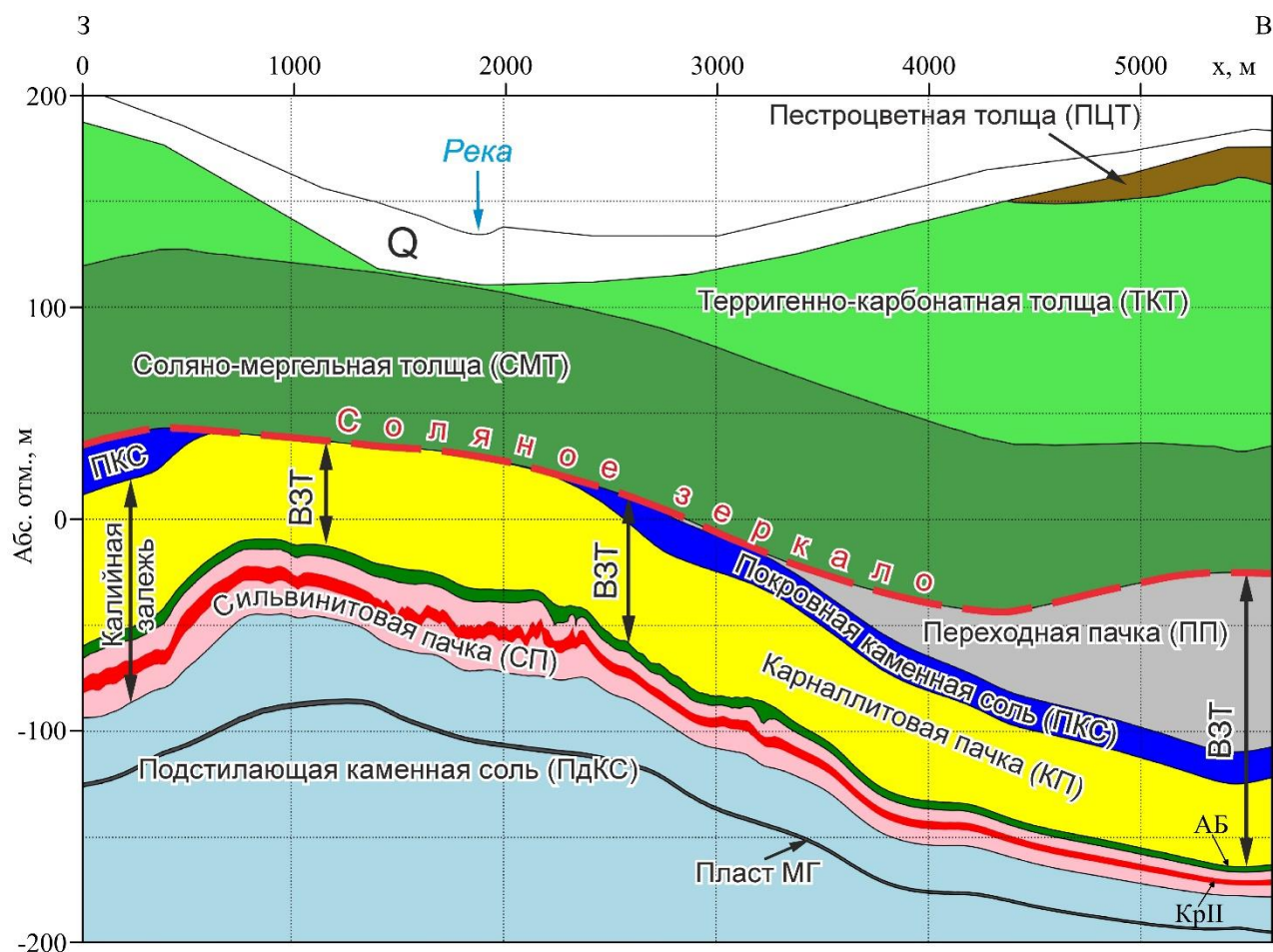


Рисунок 3 – Увеличенный геологический разрез в районе одного из поднятий на территории ВКМС прочности (по данным автора [211, 224])

ВСД на ВКМС – это типичные деформации течения (нагнетания), созданные в результате послойного неравномерного перераспределения (течения) солей (оттока из одних локальных участков и нагнетания на другие) [71]. В результате послойного пластического перераспределения солей созданы и сами соляные структуры месторождения, образуемые соляной толщей в целом. Это те же деформации течения только более крупного масштаба. Внутрисоляными деформациями осложнены, главным образом, только соляные поднятия. В прогибах соляные отложения в общем залегают сравнительно

спокойно. С усложнением общей структуры соляных поднятий становятся сложнее и интенсивнее ВСД в их ядрах. Интенсивность и характер внутрисоляных деформаций не остаются постоянными и по разрезу соляной толщи. Выделяется 4 структурных комплекса, разделенных по особенностям внутреннего строения.

Внутри соляной толщи выделяются складки: 1) охватывающие годовые прослои внутри слоев и пластов солей, измеряемые сантиметрами или несколькими дециметрами (складки первого порядка); 2) охватывающие отдельные слои и пласты солей с амплитудой до нескольких метров (второго порядка); 3) охватывающие серию пластов соляной толщи с амплитудой до нескольких десятков метров (складки третьего порядка). Таким образом, диапазон размеров объектов, влияющих на формирование упругого волнового отклика в условиях ВКМС, изменяется от сантиметров до нескольких десятков метров.

Всестороннее исследование ВСД и выявленная генетическая связь их и в целом соляных структур с послойным течением солей дает глубокое представление об инженерно-геологических условиях и опасных процессах [188], и, как следствие, позволяет значительно повысить устойчивость природно-технических систем за счет повышения безопасности строительства и эксплуатации сооружений при подземной разработке соляных месторождений.

Одним из наиболее опасных инженерно-геологических явлений, связанных с ВСД на соляных месторождениях, является так называемый инверсионный рельеф, отмечаемый в кровле куполов соляных поднятий (рисунок 3). Он возникает из-за растворения верхних соляных пластов подземными водами в ходе формирования поднятия, и выглядит как плоскость или чашеобразное углубление в его своде. Опасность для ПТС данное явление представляет в силу уменьшения мощности ВЗТ, ухудшения ее гидрогеологических свойств, и, как следствие, увеличения риска прорыва подземных вод в подземные сооружения. Известен случай, когда используемая сеть бурения, отвечающая нормативным требованиям, не позволила выявить

обширную область инверсионного рельефа, в связи с чем возник приток воды в подземные сооружения.

Кроме того, на ВКМС в куполах соляных поднятий существуют предпосылки для возникновения геологических структур, называемых каньонообразными эрозионными врезами (ЭВ) [175, 211, 224]. При формировании соляных куполов возможно превышение предельных деформаций у верхних соляных пластов, и возникновение трещин отрыва с дальнейшим расширением за счет растворения подземными водами. Риск пересечения эрозионных врезом строящимися подземными сооружениями очень высок, поскольку ЭВ проникают в соляную толщу значительно глубже, чем инверсионный рельеф, при этом, из-за гораздо более компактных размеров, обнаружить ЭВ стандартными методиками не удастся. Данная ситуация несет серьезную угрозу нарушениям целостности ВЗТ и активизации разрушительных инженерно-геологических процессов.

Еще одним опасным явлением, характерным для соляных месторождений, являются зоны замещения [28]. В их пределах отмечается замещение одних солей другими, что сопровождается ухудшением состояния горных пород, и повышенным риском возникновения газодинамических явлений. Основной причиной возникновения зон замещения является внедрение в соляную толщу флюидов, чему способствуют явления типа инверсионного рельефа и ЭВ. В результате проникновения флюидов в соляную толщу активизируются процессы метасоматоза солей, которые сопровождаются процессами замещения минеральных комплексов с изменением химического состава породы. Как правило, зоны замещения локального характера обнаруживаются лишь непосредственно при строительстве подземных сооружений, и только тогда исключаются из отработки, что не способствует повышению безопасности строительства и эксплуатации подземных сооружений.

Наличие описанных ИГУ в совокупности с непрекращающимися фактами активизации разрушительных инженерно-геологических процессов доказывает необходимость формирования инженерно-геологических моделей ПТС соляных месторождений, основанных на структуре горных массивов, и

учитывающих геологическое строение и геоморфологические признаки месторождений.

1.2. Общие сведения о ПТС в аспекте месторождений солей и шахтной сейсморазведки

Природно-технические системы (ПТС) применительно к месторождениям солей — это сложные, целостные и динамичные системы, возникающие в результате неразрывной связи и взаимодействия природных компонентов (горного массива) и созданных человеком технических сооружений и технологий [2, 45, 65, 171, 273]. Это не просто природная среда с добавленной техникой, а качественно новые образования, где природные и технические элементы взаимозависимы и функционируют как единое целое, подчиняясь как законам природы, так и законам, заложенным в технику человеком [40, 44, 109, 116, 230].

Ключевые характеристики ПТС.

1. Целостность: природные и технические компоненты образуют единую систему с общими функциями и свойствами, которые нельзя свести к простой сумме свойств частей. Изменение одного элемента влияет на всю систему.

2. Сложность: ПТС имеют множество разнородных компонентов (физические, химические, технические), связанных сложной сетью прямых и обратных связей. Их поведение часто нелинейно и трудно предсказуемо.

3. Динамичность: ПТС постоянно изменяются во времени, это связано:

- с естественной динамикой природы (движение подземных вод, изменение напряженно-деформированного состояния (НДС) горного массива).
- с развитием и износом техники.
- с целенаправленным воздействием и управлением человеком.

5. Антропогенная обусловленность: возникновение, структура и функционирование ПТС определяются целями и деятельностью человека. Техника создается и внедряется для удовлетворения человеческих потребностей.

6. Наличие цели и управления: ПТС создаются для выполнения определенных функций (обеспечение сырьем). Их функционирование требует управления (планирование, эксплуатация, контроль, адаптация), которое само становится частью системы [310].

7. Энерго- и массообмен: между природными и техническими компонентами происходит интенсивный обмен веществом (вода, воздух, сырье, отходы) и энергией (тепло, электричество, механическая энергия). Техническая часть активно преобразует природные потоки.

Проблемы и задачи, связанные с ПТС:

1. Экологические последствия: истощение ресурсов, нарушение природных циклов [185] и естественных характеристик грунтов [182], провалы земной поверхности [40, 44, 85, 89, 116, 139, 183, 281]. Техническая система может негативно влиять на природную составляющую.

2. Устойчивость и риски: ПТС подвержены природным и техногенным рискам [279, 280]. Повышение устойчивости и безопасности ПТС – критическая задача [284, 287].

3. Управление сложностью: трудности в прогнозировании поведения системы из-за нелинейности и многообразия связей [301]. Необходимость комплексного мониторинга [186, 187, 230].

4. Конфликт целей: часто цели технической эффективности (например, максимальная добыча полезного ископаемого) противоречат экологическим целям (провалы земной поверхности) или социальным (переселение людей из зоны провалов).

5. Оптимизация и развитие: поиск баланса между эффективностью функционирования техники, минимизацией негативного воздействия на природу и удовлетворением социально-экономических потребностей. Развитие ПТС требует учета долгосрочных последствий.

Понимание того, что человек имеет дело не с изолированной техникой или природой, а с единой сложной системой, является ключевым для:

– эффективного и безопасного проектирования новых технических объектов с учетом их интеграции в природную среду [136].

- рационального управления существующими системами (например, подземной инфраструктурой) для минимизации экологического ущерба и повышения устойчивости подземных сооружений.

- прогнозирования и предотвращения кризисных ситуаций и аварий [141].

- разработки стратегий устойчивого развития территорий, где техносфера гармонично вписывается в природные процессы.

Таким образом, природно-технические системы — это фундаментальная реальность современного антропоцена. Они представляют собой сложные, динамичные и целостные образования, где природные и искусственные компоненты неразрывно связаны и взаимодействуют. Успешное существование и развитие человечества невозможно без глубокого понимания закономерностей функционирования ПТС, умения их проектировать, строить и, главное, управлять ими сбалансированно, учитывая, как технико-экономические, так и экологические и социальные аспекты [233]. Концепция природно-технической системы (ПТС) "инженерно-геологический массив – подземное сооружение" в контексте данной работы является фундаментальной.

Сущность ПТС «инженерно-геологический массив – подземное сооружение».

1. Компоненты системы:

1.1. Природная подсистема ("инженерно-геологический массив") [62, 61, 157]:

1.1.1. Геологическое строение (стратиграфия, литология) [163].

1.1.2. Тектоническая нарушенность (разломы, складчатость).

1.1.3. Физико-механические свойства пород (прочность, упругие модули, плотность) [170].

1.1.4. НДС массива (естественное и техногенно измененное).

1.1.5. Гидрогеологические условия [166].

1.2. Техническая подсистема ("подземное сооружение"):

1.2.1. Тип и геометрия выработки (штрек, квершлаг, орт, лава, камера и т.д.).

1.2.2. Способ проходки и крепления.

- 1.2.3. Технология ведения горных работ (очистная выемка, проходка, управление кровлей).
- 1.2.4. Горное оборудование (комбайны, буровые установки, системы вентиляции, водоотлива).
- 1.2.5. Системы мониторинга (включая сейсморазведочную аппаратуру).
- 1.2.6. Временной фактор (стадия строительства, срок службы подземного сооружения).

2. Ключевые характеристики ПТС в контексте изменения ИГУ:

2.1 Глубокая взаимозависимость и целостность. Любое воздействие техники (проходка, выемка, взрыв) мгновенно изменяет состояние массива (НДС, трещиноватость, фильтрационные свойства). Эти изменения, в свою очередь, влияют на устойчивость подземных сооружений, безопасность работ и характеристики сейсмического волнового поля.

2.2. Динамичность во времени и пространстве. Система эволюционирует:

- 2.2.1. Кратковременно: взрыв, работа комбайна, обрушение кровли.
- 2.2.2. Среднесрочно: продвижение забоя, изменение зон обрушения, перераспределение напряжений.
- 2.2.3. Долгосрочно: развитие горных работ, старение крепи, ползучесть пород.

2.3. Сильная неоднородность и анизотропия. Массив изначально неоднороден и анизотропен (слоистость, складчатость, трещины). Горные работы, помимо природной неоднородности, создают зоны техногенной неоднородности и анизотропии (зоны разрыхления, трещины откола, области концентрации напряжений). Это один из объектов изучения шахтной сейсморазведки.

2.4. Наличие обратных связей. Данные сейсморазведки (в том числе и мониторинговых работ) используются для управления системой путем корректировки технологии работ, усиления крепи, прогноза и предотвращения динамических явлений (удары, выбросы). Управляющее воздействие в свою очередь снова меняет состояние ПТС.

2.5. Целенаправленность. Основная цель ПТС «инженерно-геологический массив – подземное сооружение» – безопасное и эффективное строительство и эксплуатация подземных сооружений и добыча полезного ископаемого.

Место подземных сооружений в общей классификации зданий и сооружений.

В научной и учебной литературе, посвященной строительству зданий и сооружений, в отношении подземных сооружений сложилась своеобразная ситуация, при которой к последним относят лишь транспортные тоннели, и совсем не упоминаются горные выработки, построенные для других целей [111, 238]. При этом нормативная документация однозначно классифицирует горные выработки как подземные сооружения: «горная выработка – это *искусственное сооружение* в недрах Земли или на ее поверхности, созданное в результате ведения горных работ с целью выполнения ее функционального назначения и сохранения в течение определенного срока времени [77]».

Кроме того, действующий СП 91.13330.2012 «Подземные горные выработки» [269] в п.4.3 предъявляет следующие требования: «Выработки следует проектировать в соответствии с законами РФ, ..., результатами ... *инженерных изысканий, включающими в себя данные инженерно-геологического изучения* мест размещения выработок...». П. 5 этого же СП полностью посвящен инженерно-геологическим изысканиям для проектирования и строительства выработок, и требует выполнять указанные изыскания *в соответствии с СП 47.13330 «Инженерные изыскания для строительства»* [265].

Таким образом, нормативная документация однозначно рассматривает горные выработки как инженерные сооружения, инженерно-геологические изыскания под проектирование и строительство которых должны выполняться в соответствии с теми же требованиями, которые предъявляются и к изысканиям под проектирование и строительство наземных зданий и сооружений. В связи с данным фактом, классификации сооружений, отдельно представленные в литературе по наземному и подземному (шахтному)

строительству объединены в единую блок-схему, позволяющую увидеть общую картину, и место в ней подземных сооружений (рисунок 4).

Разработанная схема иллюстрирует значительное многообразие видов подземных сооружений, коренным отличием которых от наземных зданий и сооружений являются следующие моменты:

- все виды ресурсов (воздух, электроэнергия, ГСМ, строительные материалы, вода), сотрудники и техника транспортируются в подземные сооружения через единичные горные выработки, как правило, это шахтные стволы и другие капитальные выработки;
- значительно более сложные системы вентиляции, изменяющиеся по мере отработки шахтного поля;
- наземные сооружения контактируют с инженерно-геологическим массивом (ИГМ) только через фундамент, находящийся в их основании, в то время как подземные сооружения полностью «погружены» в ИГМ, что делает их крайне зависимыми от таких факторов, как уровень подземных вод, горное давление, трещиноватость, растворимость, напряженно-деформированное состояние (НДС) и предел прочности пород, слагающих ИГМ.

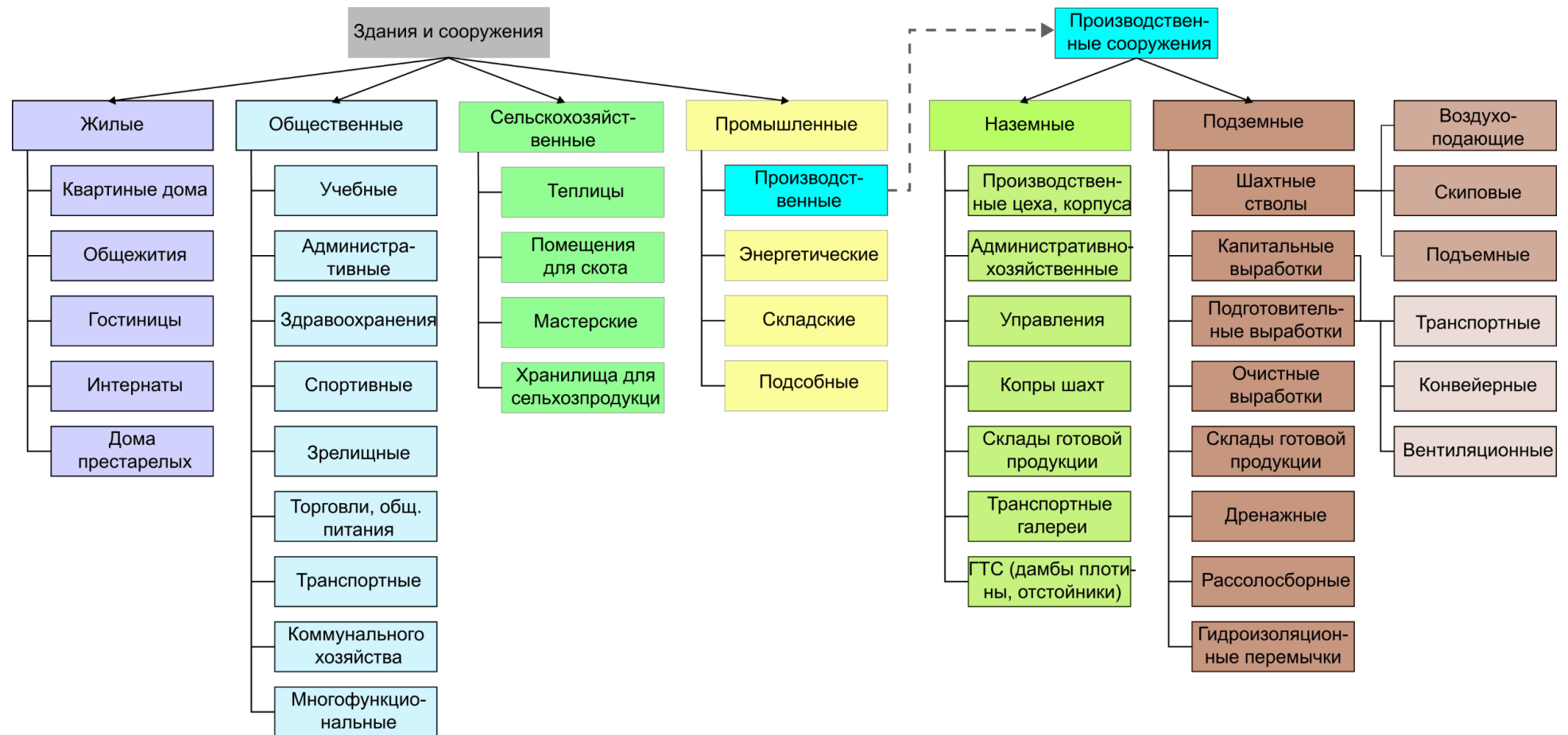


Рисунок 4 – Обобщенная классификация зданий и сооружений, включая подземные (по данным [238, 261] с доработками автора)

Роль шахтной сейсморазведки в изучении ПТС «инженерно-геологический массив – подземные сооружения». Сейсморазведка здесь – не просто геофизический метод, а «интегральный датчик» состояния всей ПТС. Он чувствителен к изменениям упругих свойств массива, связанным с вещественным составом слагающих его инженерно-геологических элементов (ИГЭ) или расчетных элементов (РЭ), а также со взаимодействием природного компонента (исходные свойства пород) и техногенного воздействия (выработка, горное давление, разрушение). В связи с этим, сейсморазведка способна обеспечить решение таких задач как изучение ИГУ (тектоники, литологии, опасных процессов), контроль состояния массива, оценка ширины и свойств целиков.

Специфика шахтной сейсморазведки как инструмента для исследования ПТС «горный массив – подземные сооружения»:

- расположение источников и приемников внутри массива (в выработках, скважинах). Это дает высокое разрешение, но создает сложности: сильные помехи от горной техники, вентиляции.
- сложная геометрия наблюдений (трехмерность, ограниченный доступ).
- влияние самой выработки ("выработка-волновод", зона нарушенных пород вокруг выработки).
- высокая частота сигналов обеспечивает повышение разрешающей способности вблизи выработок, но приводит к повышенному затуханию и влиянию мелкомасштабных неоднородностей.

Исследование ПТС «инженерно-геологический массив – подземное сооружение» методами шахтной сейсморазведки находится на стыке современных *инженерной геологии, геофизики и горного дела*, и позволяет внести значительный вклад в повышение безопасности подземного строительства путем развития следующих направлений:

- разработка высокоразрешающих методов для сложных условий ПТС.
- установление надежных связей между сейсмическими параметрами и характеристиками состояния горного массива (прочностью, модулями упругости).

– создание прогнозных геофизических и инженерно-геологических моделей на основе мониторинга ПТС.

Подход к объекту исследования как к сложной, динамичной и целостной природно-технической системе "инженерно-геологический массив – подземное сооружение" является методологически корректным и перспективным. Исследования в данном направлении имеют значительный потенциал для развития методов диагностики и прогноза состояния этой критически важной системы, напрямую влияющей на безопасность и эффективность подземного строительства в пределах соляных месторождений.

1.3 Природно-технические системы «инженерно-геологический массив – подземные сооружения»

На основе информации, приведенной в предыдущих разделах, сформирована ПТС «инженерно-геологический массив – подземные сооружения» (ПТС «ИГМ–ПС»), характерная для подземной разработки соляных месторождений на примере ВКМС. Масштаб рассматриваемой ПТС – локальный, то есть ПТС формируется и функционирует под влиянием взаимодействий комплекса сооружений (подземный комплекс рудника) и литосферой [109]. Модель указанной ПТС с действующими подземными сооружениями представлена ниже (рисунок 5).

Природные составляющие ПТС представлены следующими расчетными элементами (сверху вниз) [73–76, 78]:

- РЭ1 – четвертичные отложения;
- РЭ2 – ПЦТ (пестроцветная толща);
- РЭ3 – ТКТ (терригенно-карбонатная толща);
- РЭ4 – СМТ (соляно-мергельная толща);
- РЭ5 – РП (ритмопачки – нижняя часть соляно мергельной толщи);
- РЭ6 – ПКС (покровная каменная соль);
- РЭ7 – КП (карналлитовая пачка);
- РЭ8 – СП (сильвинитовая пачка);

– РЭ9 – ПдКС (подстилающая каменная соль).

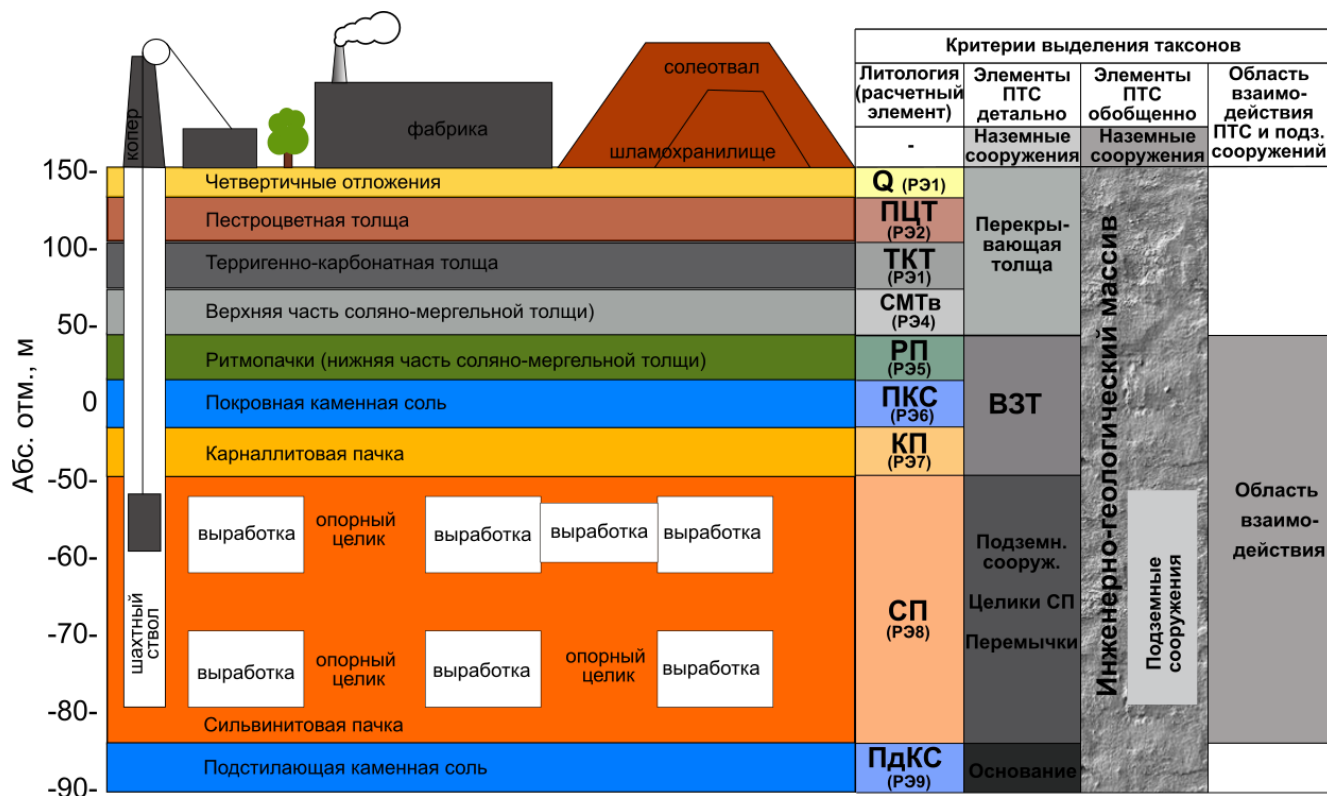


Рисунок 5 Модель ПТС «инженерно-геологический массив – подземные сооружения», все подземные сооружения действующие (по данным автора)

ПТС «ИГМ–ПС» может быть рассмотрена на двух уровнях детализации – детальном и обобщенном. На *детальном* уровне выделяются следующие элементы:

- наземные сооружения,
- *перекрывающая толща* – последовательность расчетных элементов от поверхности земли до кровли ВЗТ – от РЭ1 до РЭ4,
- *ВЗТ*, включающая в себя ритмопачки (РП), покровную каменную соль (ПКС) и карналлитовую пачку (КП) – расчетные элементы от РЭ5 до РЭ7,
- *подземные сооружения* (горные выработки), целики и перемычки в сильвинитовой пачке (СП, РЭ8) и подстилающей каменной соли (ПдКС, РЭ9),
- *основание* (ПдКС) –РЭ9;

Элементы, выделяемые на *обобщенном* уровне:

- наземные сооружения,
- инженерно-геологический массив – расчетные элементы от РЭ1 до РЭ9,
- подземные сооружения.

Область взаимодействия, ввиду особенностей геологического строения и глубины строительства подземных сооружений, включает в себя ВЗТ и СП.

ВЗТ является критически важным элементом рассматриваемой ПТС, поскольку в устойчивом состоянии она является естественным водоупором, препятствующим поступлению вод из вышележащих горизонтов в подземные сооружения и их затоплению. В случае даже незначительных повреждений ВЗТ, неизбежно возникает приток пресных вод в подземный комплекс, которые, в силу высокой растворимости солей, быстро увеличивают масштабы нарушений ВЗТ. Далее возникает своего рода цепная реакция, когда приток пресных вод увеличивает масштабы нарушений, а они, в свою очередь, приводят к еще большему увеличению притока. Спасти комплексы подземных сооружений в подобных ситуациях крайне сложно, и возможно лишь в отдельных случаях, когда изначальный приток совсем невелик, а меры по его устранению применяются практически «мгновенно». Разработке методики контроля за ИГУ, в которых находится ВЗТ, посвящена четвертая глава данной работы.

ПТС «ИГМ – ПС» может включать в себя не только действующие подземные сооружения, но и ликвидированные в плановом порядке (рисунок 6). Причины плановой ликвидации заключаются, как правило, в необходимости закладки выработанного пространства для замедления и остановки проседания земной поверхности. В случае ликвидации подземных сооружений путем заполнения рассолами, возникает необходимость контроля за состоянием гидроизолирующих целиков, отделяющих действующие части рудников от заполненных, чему посвящена пятая глава данной работы.

Между элементами ПТС «ИГМ – ПС» действуют различные обратные связи (ОС), часть из которых оказывают позитивное влияние на устойчивость ПТС («позитивные» ОС), а часть – негативное («негативные» ОС). Переход ОС из позитивных в негативные приводит к нарушению устойчивости ПТС.

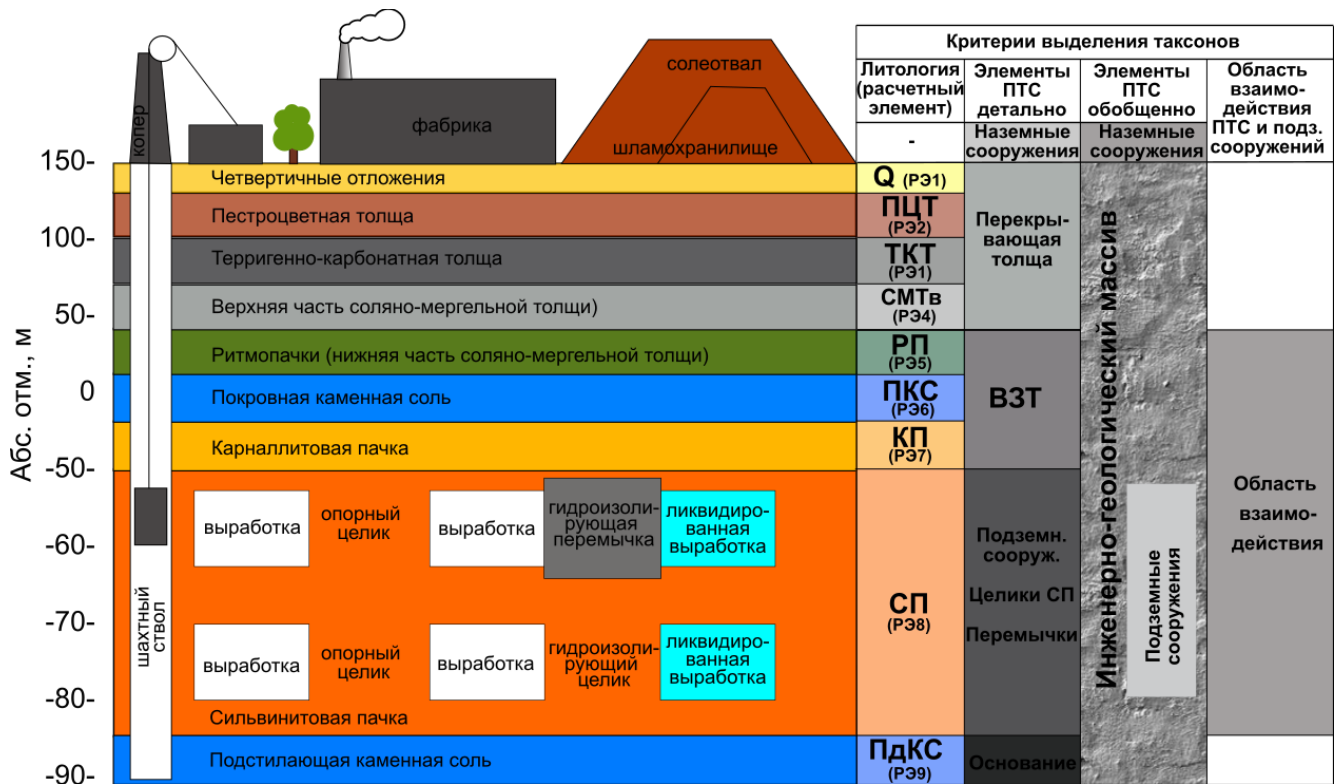


Рисунок 6 – Модель ПТС «инженерно-геологический массив – подземные сооружения», часть подземных сооружений ликвидировано в плановом порядке (по данным автора)

Всего можно выделить три состояния ПТС «ИГМ – ПС»:

– *устойчивое* – все элементы ПТС находятся в равновесном состоянии, подземные сооружения функционируют в нормальном режиме (рисунок 7), большинство ОС относятся к позитивным, что компенсирует воздействие негативных ОС (рисунок 8);

– *неустойчивое* – часть ОС переходит из разряда позитивных в разряд негативных. В таком состоянии, если не предпринять срочные меры, ПТС может быстро перейти в критическое (нарушенное) состояние, при принятии своевременных и достаточных мер возможен перевод ПТС обратно в устойчивое состояние;

– *критическое* (нарушенное) – подземные сооружения частично или полностью затоплены в аварийном режиме, возможны провалы и обрушение сооружений на поверхности (рисунок 9) [124, 148, 153–154, 289, 290], большинство

или все ОС переходят в разряд негативных (рисунок 10), переход к устойчивому состоянию невозможен.

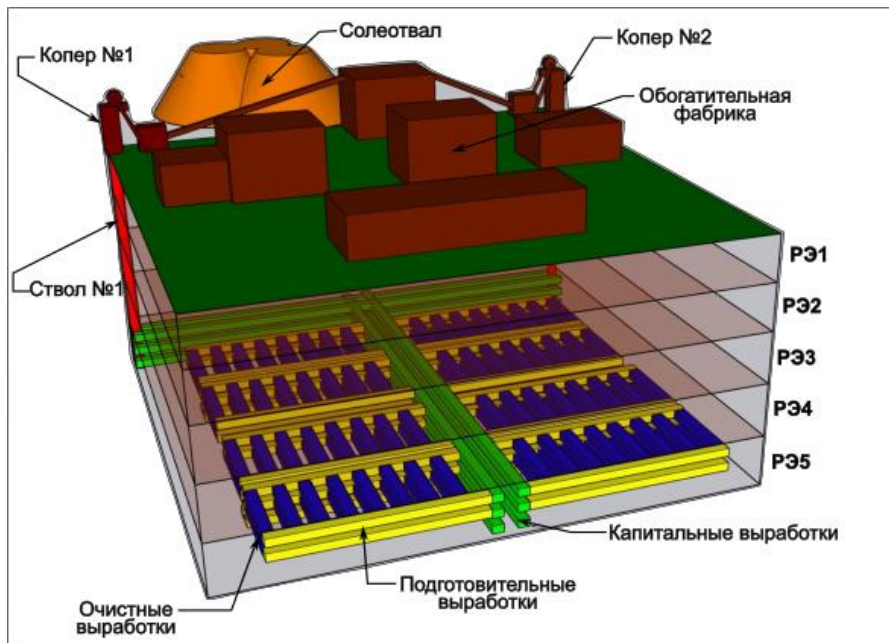


Рисунок 7 – ПТС «ИГМ – ПС», состояние устойчивое (не в масштабе, по данным автора)

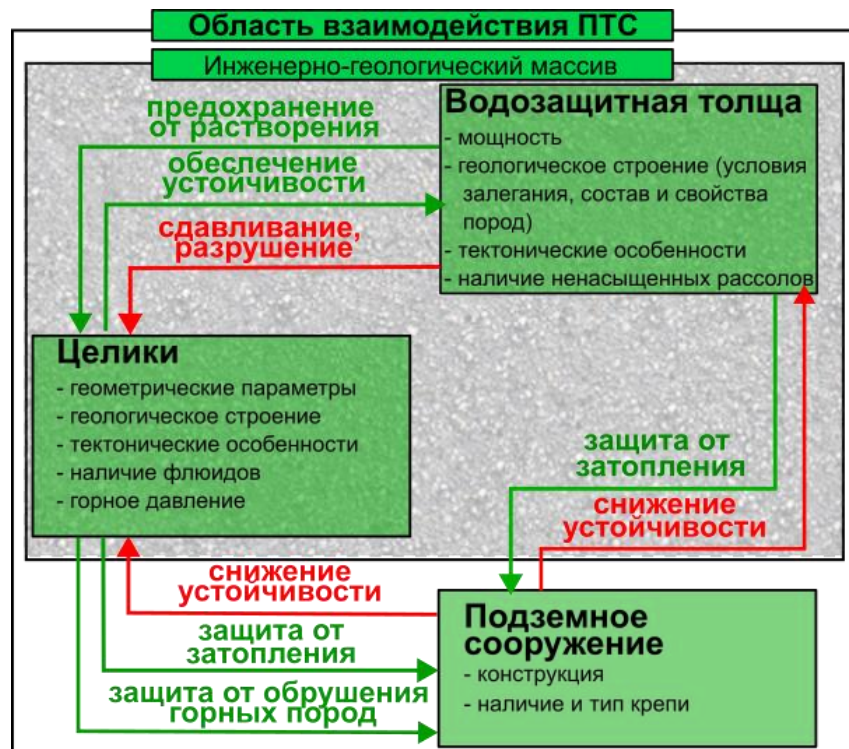


Рисунок 8 – Взаимосвязи элементов ПТС «ИГМ – ПС» в области взаимодействия, состояние устойчивое (по данным автора)

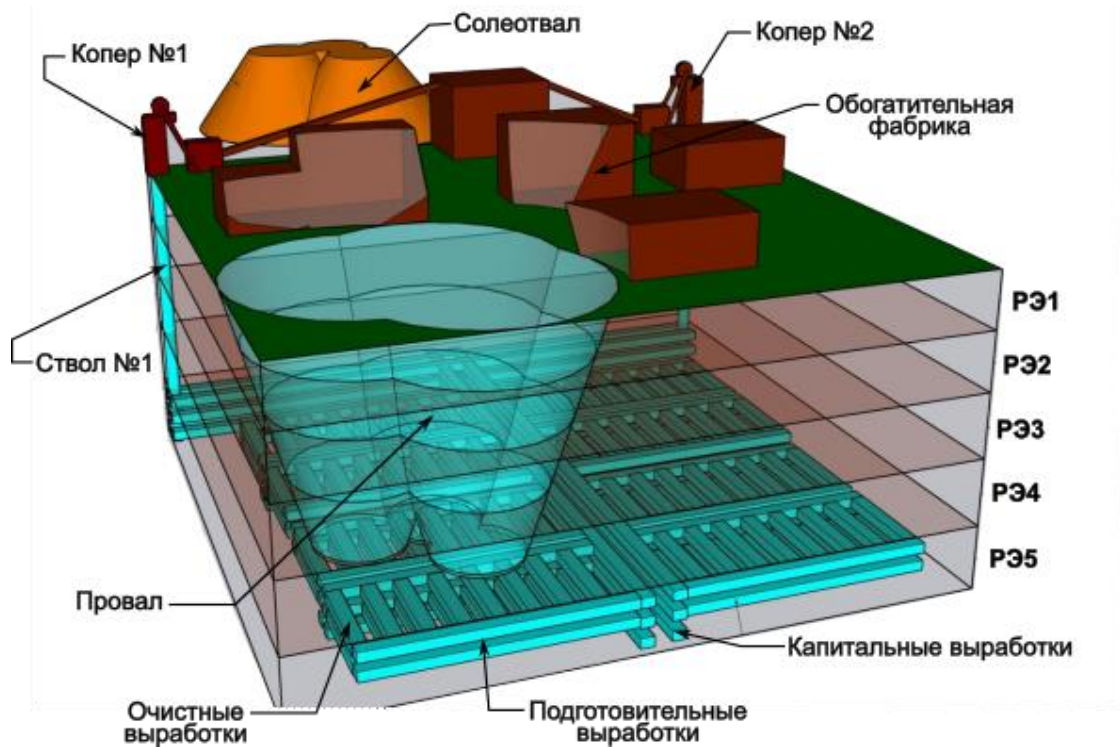


Рисунок 9 – ПТС «ИГМ – ПС», состояние критическое (не в масштабе, по данным автора)

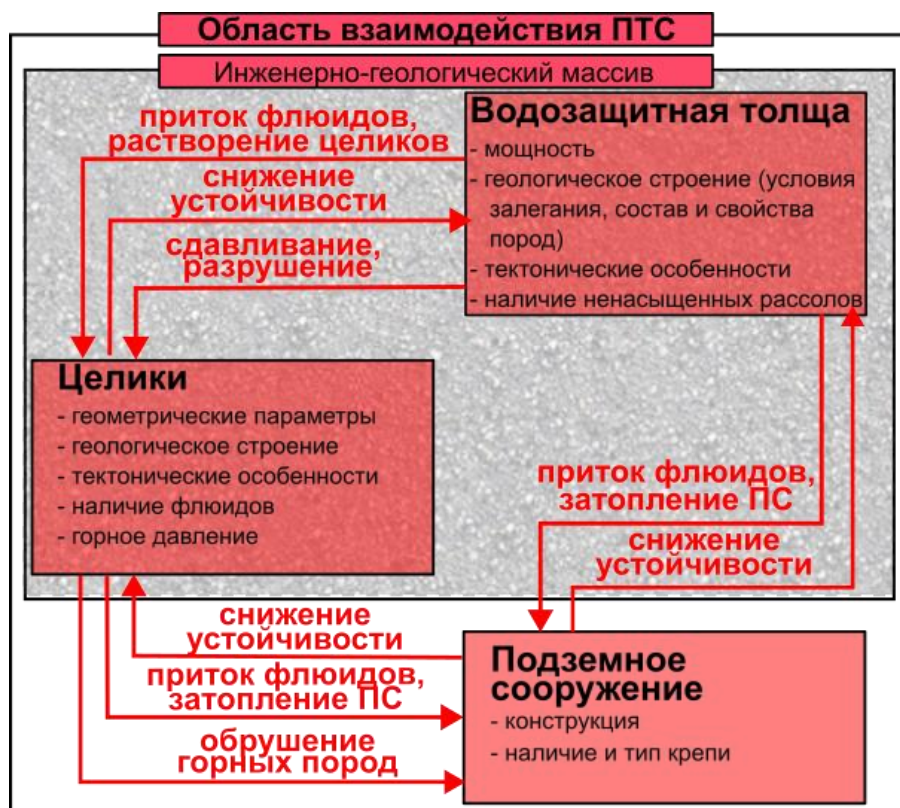


Рисунок 10 – Взаимосвязи элементов ПТС «ИГМ – ПС» в области взаимодействия, состояние критическое (по данным автора)

1.4 Сценарии развития состояния ПТС «ИГМ – ПС»

В соответствии со стратегиями контроля за состоянием элементов ПТС «ИГМ – ПС», принятыми на действующих рудниках при подземной разработке соляных месторождений, выделяются несколько групп сценариев развития состояния ПТС и их элементов. Группы сценариев наиболее полно, и при этом компактно отображаются в виде блок-схем.

Группа сценариев без контроля состояния элементов ПТС. В случае, когда контроль за ИГУ в пределах ВЗТ не ведется, либо ведется неэффективными методиками, в процессе строительства и эксплуатации подземных сооружений любое нарушение целостности ВЗТ, достигающее подземных сооружений, приводит к притоку в них сначала рассолов, а затем и пресных вод. В результате ПТС переходит в неустойчивое состояние, с высоким риском дальнейшего перехода в критическое (нарушенное) состояние.

Группа сценариев при отсутствии контроля за состоянием элементов ПТС указывает на полную непредсказуемость изменения ИГУ и состояния подземных сооружений (рисунок 11). Негативная динамика состояния ПТС в данных условиях устанавливается лишь постфактум, после возникновения каких-либо очевидных событий, зависит лишь от их природы и масштаба, и мало зависит от усилий недропользователей. Даже в случае строительства гидроизолирующих перемычек, отсутствие контроля за сохранностью гидроизолирующих целиков может привести к повторному непредсказуемому притоку рассолов в действующие сооружения (рисунок 12).

Очевидно, что данная группа сценариев крайне нежелательна при реализации проектов по эксплуатации месторождений полезных ископаемых, поскольку приводит к высокому риску аварийного сокращения ресурсной базы и утраты построенной ранее инфраструктуры, как подземной, так и наземной. Наиболее эффективный способ перехода к более позитивным группам сценариев – внедрение в процесс проектирования и строительства методов эффективного контроля и мониторинга ИГУ и устойчивости ПТС.

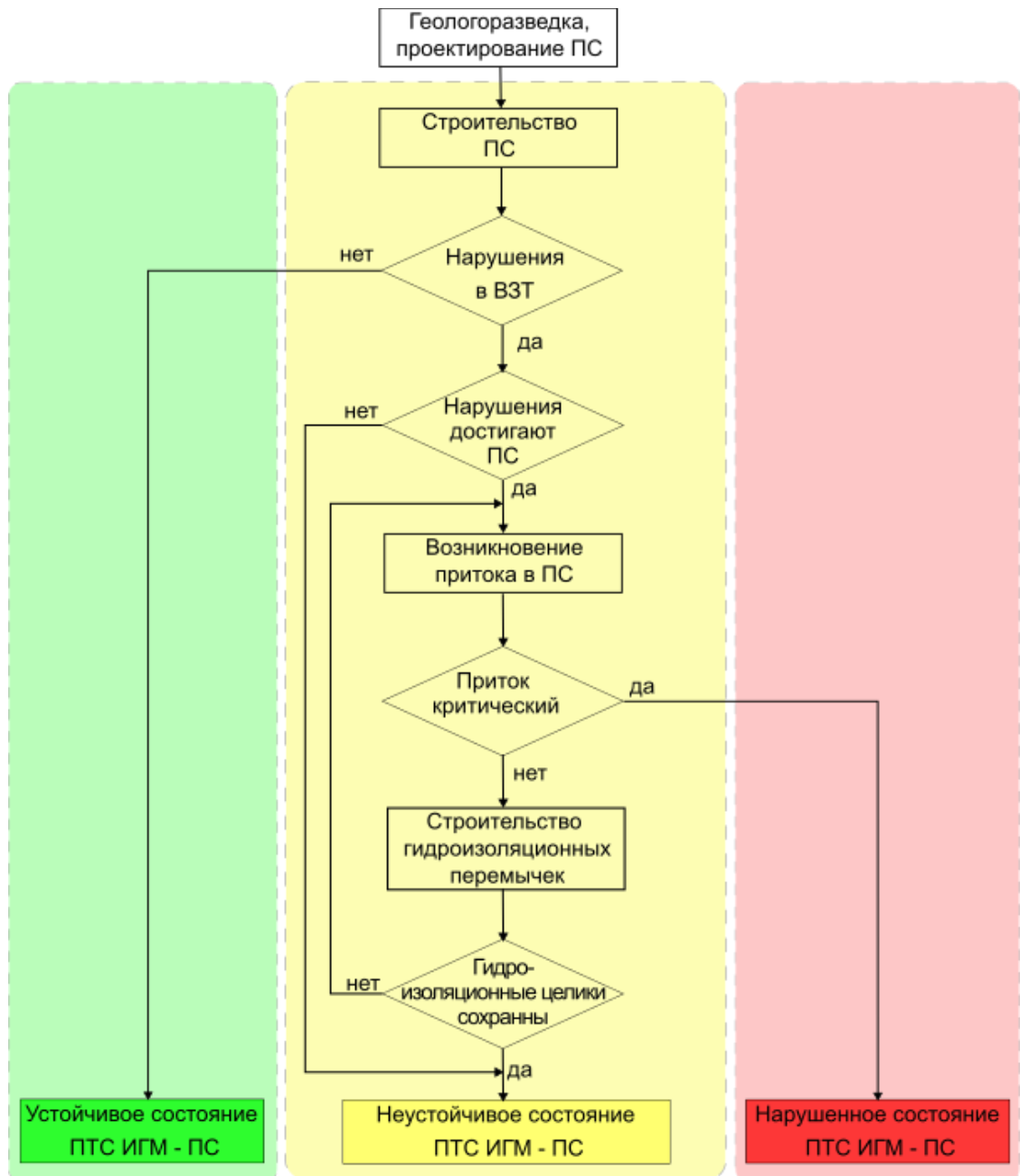


Рисунок 11 – Группа сценариев развития устойчивости ПТС без контроля за состоянием ее элементов (по данным автора)

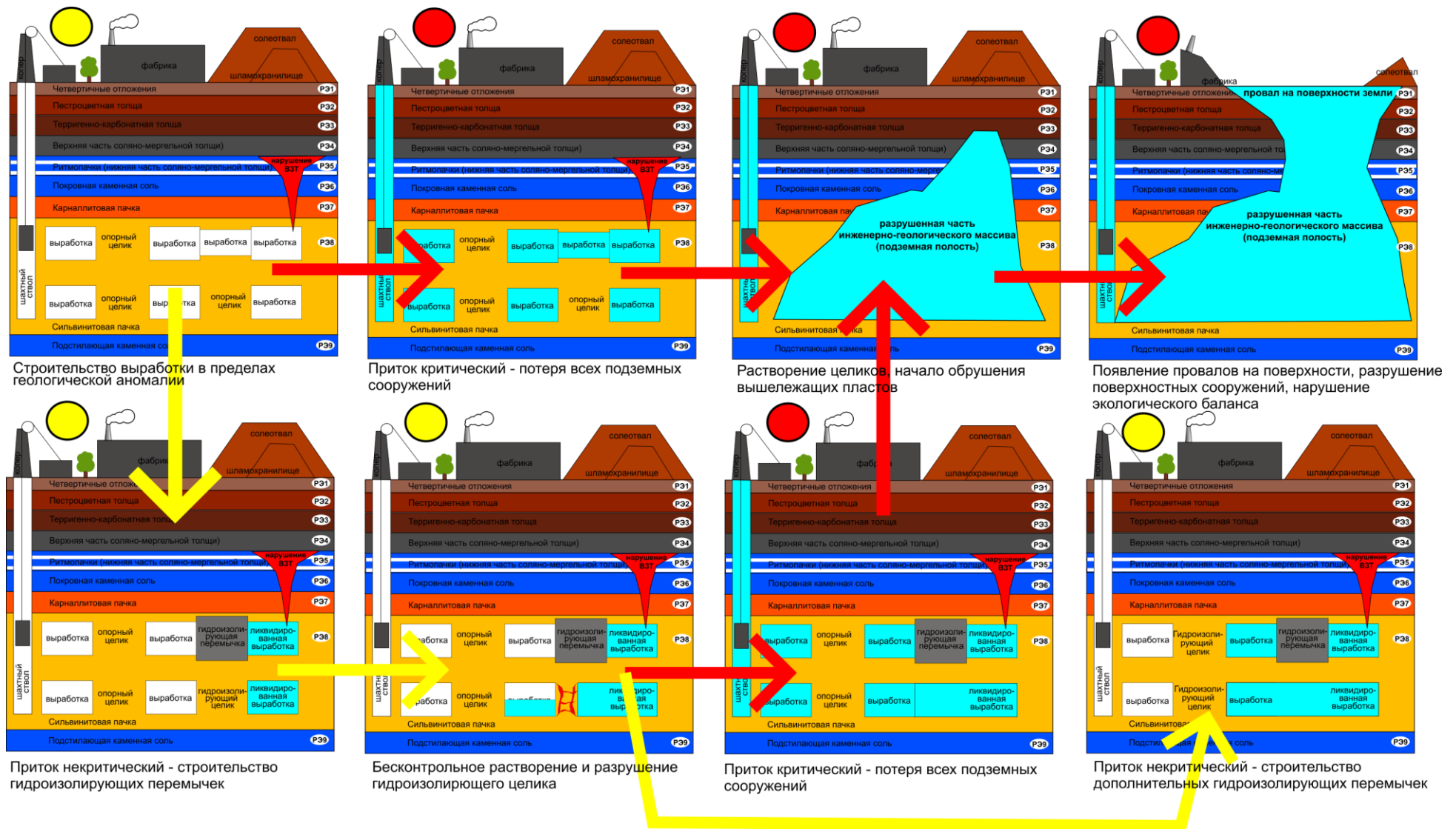


Рисунок 12 – Варианты развития состояния ПТС без контроля за состоянием ее элементов (по данным автора)

Группа сценариев с дистанционным контролем состояния гидроизолирующих целиков после возникновения притока в подземные сооружения через ВЗТ.

В случае возникновения притока флюида в подземные сооружения, который не представляется возможным купировать в кратчайшие сроки, ПТС практически гарантированно приходит в нарушенное состояние – весь комплекс подземных сооружений затапливается в течение максимум нескольких месяцев [23, 155, 156, 305, 315]. Если же приток удастся приостановить, например, путем строительства гидроизолирующих перемычек, ПТС фиксируется в неустойчивом состоянии, но с этого момента в ее состав включаются такие специфические элементы, как гидроизолирующие целики [22, 217]. Последние, с одной стороны, отделяют действующие подземные сооружения от заполненных рассолами, а с другой стороны, в случае нарушения целостности, сами представляют угрозу повторного затопления.

Во избежание полной потери устойчивости ПТС из-за проникновения флюидов в действующие подземные сооружения через гидроизолирующие целики необходим мониторинговый контроль за их состоянием и шириной. Проложенные через гидроизолирующие перемычки слаботочные электрические сети могли бы служить инфраструктурной основой для формирования мониторинговой сети, в том числе для снятия информации с датчиков, заранее установленных в заполненных рассолами подземных сооружениях. Такой подход мог бы позволить получать сведения о ширине и состоянии гидроизолирующих целиков в режиме онлайн. Однако, в целях безопасности, внутри гидроизолирующих перемычек запрещено прокладывать какие бы то ни было коммуникации, в том числе и электрические провода. Поэтому, единственным действенным подходом к осуществлению контроля за устойчивостью ПТС является оценка и прогноз ИГУ и ширины целиков путем применения инженерно-геофизических исследований (рисунок 13) [217].

Такой контроль обеспечивает соответствующие службы информацией, необходимой для принятия своевременных решений по предотвращению

аварийных ситуаций и потери подземных сооружений, и существенно сокращает риск их возникновения (рисунок 14). Риск возникновения негативных событий в данной группе сценариев развития состояния ПТС резко уменьшается, однако, остается неохваченным направление по контролю за ИГУ в области ВЗТ.



Рисунок 13 – Группа сценариев развития состояния ПТС с контролем ширины и состояния гидроизолирующих целиков (по данным автора)

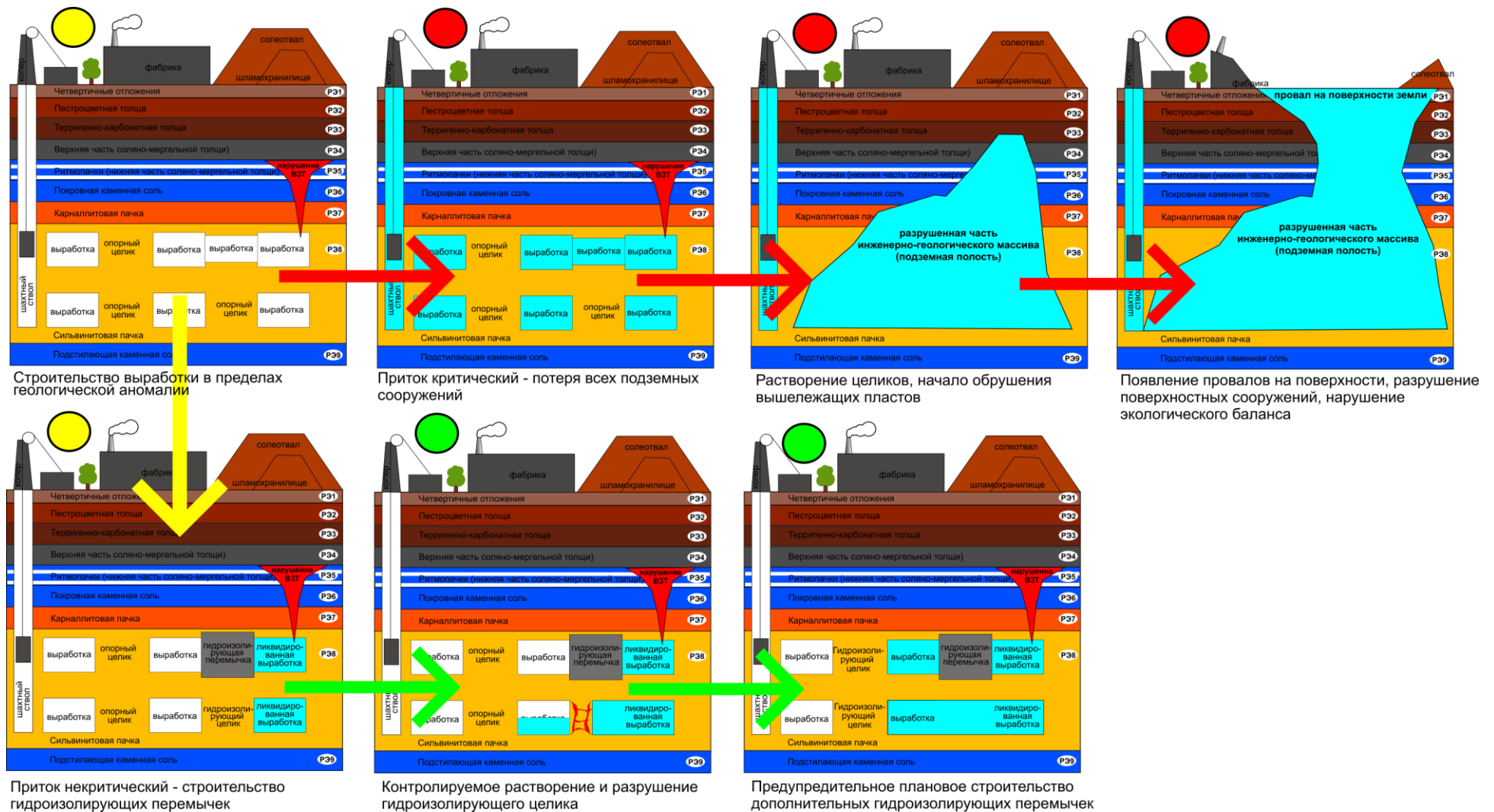


Рисунок 14 – Варианты развития состояния ПТС с контролем за состоянием гидроизолирующих целиков (по данным автора)

Группа сценариев с дистанционным контролем ИГУ и состояния гидроизолирующих целиков на этапе геологоразведки и проектирования подземных сооружений. Наиболее перспективным является подход, при котором контроль за устойчивостью ПТС ведется путем контроля ИГУ и опасных процессов в области ВЗТ начиная с этапов геологоразведки и проектирования подземных сооружений. В данном случае, опасные процессы выявляются еще до начала строительства подземных сооружений (рисунок 15), после чего полученная информация учитывается в проектных решениях. Такой подход позволяет исключить переход ПТС в неустойчивое и нарушенное состояния благодаря полному сокращению возможностей ветвления сценариев за счет своевременного внесения корректив в проекты подземных сооружений и контроля за состоянием элементов ПТС (рисунок 16).

Для реализации рассматриваемой группы сценариев с помощью дистанционного контроля методом шахтной сейсморазведки необходима проходка разведочных горных выработок. Данное требование вполне реализуемо, поскольку проходка одиночных горных выработок допускается в рамках лицензий на геологическое изучение и разведку недр. Для оптимизации финансовых и материальных затрат, указанные выработки необходимо изначально проектировать таким образом, чтобы в дальнейшем использовать их в качестве капитальных. Строительство таких подземных сооружений в случае, например, ВКМС, в подстилающей каменной соли гарантирует их длительную устойчивость – десятки лет, что подтверждается многочисленными примерами на территории указанного месторождения.

По сути дела, аварийные ситуации в данной группе сценариев исключаются простым исключением участков со сложными ИГУ либо с опасными процессами, когда подземные сооружения не проектируются и не строятся в указанных областях, что сводит риск перехода ПТС в неустойчивое либо в критическое состояние к минимуму. В случае, когда на действующем шахтном поле имеются участки, ликвидированные путем заполнения рассолами, целью контроля становятся не только ИГУ, но и ширина и состояние гидроизолирующих целиков (рисунок 16).



Рисунок 15 – Группа сценариев развития состояния ПТС с контролем ИГУ на стадии проектирования подземных сооружений (по данным автора)]

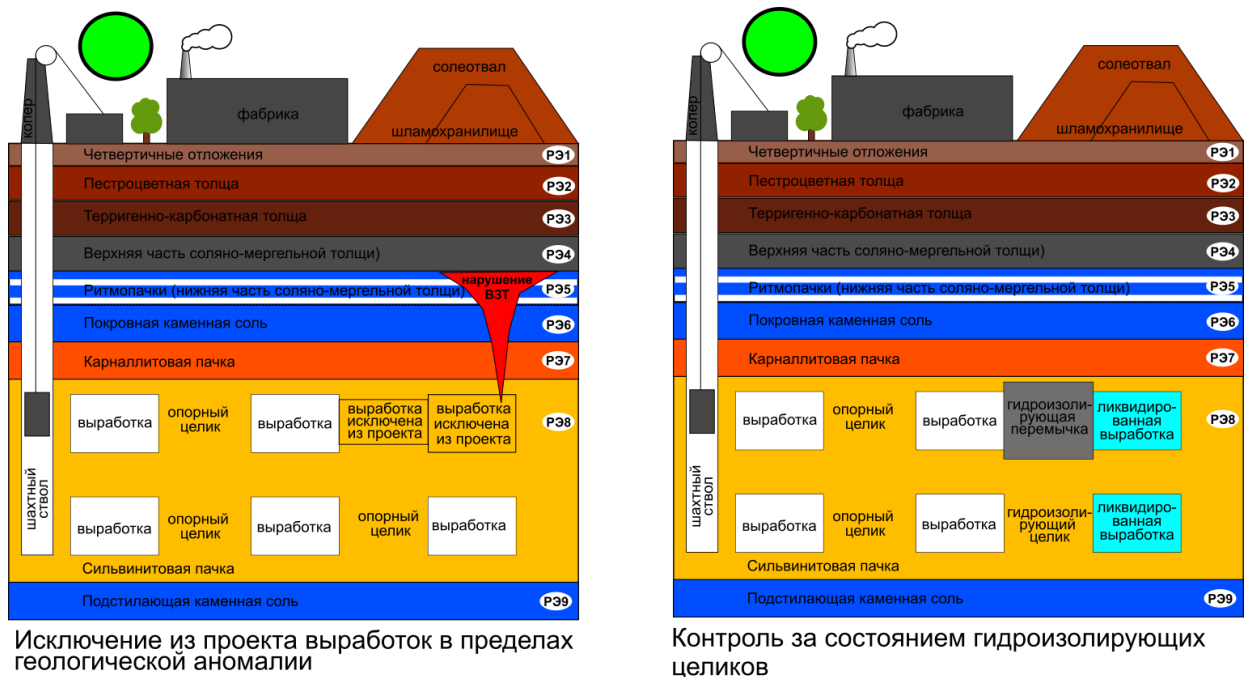


Рисунок 16 – Варианты развития состояния ПТС с контролем ИГУ на стадии проектирования подземных сооружений (по данным автора)

Выводы по главе. Рассмотрены общие сведения о ПТС «инженерно-геологический массив – подземные сооружения» применительно к подземной разработке соляных месторождений на примере ВКМС. Раскрыта структура и элементы данных ПТС на разном уровне детализации, область взаимодействия, показана природа и вид обратных связей между элементами ПТС в области их взаимодействия. Представлены основные группы сценариев развития состояния указанных ПТС, и пути управления данными сценариями на основе оценки и прогноза устойчивости ПТС путем контроля ИГУ, а также ширины и состояния гидроизолирующих целиков. Показано, что наиболее предпочтительным подходом является предупредительный контроль за ИГУ и гидроизолирующими целиками на стадии геологоразведки и проектирования подземных сооружений, поскольку он исключает неконтролируемый переход ПТС «ИГМ – ПС» в неустойчивое и критическое состояния.

Таким образом установлено, что природные факторы, в том числе ВСД, инверсионный рельеф, ЭВ и зоны замещения в сочетании с техногенной нагрузкой на горный массив, создаваемой подземной разработкой соляных месторождений, приводят, в условиях недостатка объективной информации об ИГУ, к активизации разрушительных инженерно-геологических процессов.

Таким образом показано, что необходимо существует острая необходимость в разработке инженерно-геологических моделей, учитывающих описанные природные и техногенные факторы, и в реализации системы высокотехнологичной и эффективной оценки и мониторинга состояния массивов горных пород, что позволит значительно снизить риски активизации разрушительных процессов и повысить безопасность строительства и эксплуатации сооружений при подземной разработке соляных месторождений.

Глава 2. ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩИЙ МЕТОД ШАХТНОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ НА ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛНАХ С РАЗДЕЛЕНИЕМ ОТРАЖЕНИЙ

Первое защищаемое научное положение. Создан и научно обоснован новый метод инженерно-геологических исследований - шахтная сейсморазведка на поперечных волнах с разделением отражений (ПВРО), базирующийся на выявленных закономерностях распространения упругих волн в условиях полного пространства. Метод включает согласованные методики полевых работ и камеральной обработки, обеспечивающие выделение отражений от геологических границ с разрешающей способностью до 1–2 м, и позволяет оперативно получать детальные структурные, тектонические и физико-механические характеристики массивов горных пород, взаимодействующих с подземными сооружениями.

2.1 Роль геофизических методов при инженерных изысканиях на месторождениях солей

Наиболее точную информацию об инженерно-геологических условиях, ключевым образом влияющих на устойчивость ПТС при подземной разработке соляных месторождений, дают прямые методы [106, 107, 261–264, 303]. Однако, информация от прямых методов поступает лишь в направлении оси горных выработок – скважин [232], штреков, шахтных стволов, а надежность интерполяция между ними сильно зависит от расстояния и сложности геологического строения. Бурение скважин очень затратно [135], кроме того, вокруг стволов скважин, бурящихся с поверхности, в целях защиты от затопления комплексов подземных сооружений необходимо сохранять целики [172], что приводит к значительным потерям запасов полезного ископаемого. В связи с указанными причинами сеть скважин на месторождениях солей довольно редкая, и расстояние между ними, как правило, составляет 2 км. Скважины же, пробуриваемые из подземных сооружений, например, на ВКМС, нельзя проходить выше пласта В, чтобы не нарушить целостность ВЗТ. В силу перечисленных причин, при подземной разработке соляных месторождений возможности по детальному изучению ИГУ на основе проходки горных выработок, как вертикальных, так и горизонтальных (наземные и подземные скважины, шахтные

стволы и штреки) крайне ограничены.

Таким образом, прямые методы, с одной стороны, дают ценную информацию об ИГУ в общем плане [235, 258, 276], а с другой стороны не позволяют создавать детальные инженерно-геологические модели, и даже более того, могут сформировать ложное представление о деталях геологического строения изучаемого участка из-за неточной интерполяции точечных данных. Так, применительно к ВКМС известно, что существует надежная корреляция между абсолютными отметками геологических границ в продуктивной толще и в ВЗТ. Этот факт во многих случаях позволяет строить надежные инженерно-геологические модели на основании данных о проходке горных выработок. Однако, как показала практика, на ВКМС имеются отдельные участки, где соляное зеркало (СЗ), под которым понимается воображаемая линия, соединяющая кровлю самых верхних слоев каменной соли, залегает несогласно с геологическими границами в продуктивной толще. В этом случае инженерно-геологическая модель, построенная на основании предположений о надежной корреляции отметок продуктивных пластов и соляного зеркала, может быть настолько не адекватной фактическому геологическому строению, что строительство подземных сооружений приведет к аварийным ситуациям, угрожающим затоплением всему комплексу подземных сооружений, и, соответственно полным нарушением устойчивости ПТС.

Геофизические исследования при подземной разработке месторождений позволяют получать непрерывную по профилю и по площади информацию [68], существенно дополняя таким образом сведения, получаемые при проходке горных выработок [36, 52, 56, 67, 88, 202, 255, 272, 274, 308, 320]. Данный вид изыскательских и поисково-разведочных работ применялся и применяется очень широко [53, 87, 142, 151, 177–178, 195–201, 204, 273, 278, 293, 319], в том числе на Верхнекамском месторождении солей (ВКМС) [17, 50–51, 86, 94–101, 125–130, 167, 174, 190, 192, 226, 239–241, 267, 296, 312]. Однако, несмотря на последние достижения в области аппаратурно-программного и методического обеспечения геофизических работ, до 2019 года не было разработано метода, позволяющего строить геофизические и инженерно-геологические модели ПТС высокой степени

достоверности и детальности для получения новых сведений об инженерно-геологических условиях массива горных пород [104, 105] и оценки устойчивости ПТС. Данный факт подтверждается ставшими теперь уже многочисленными аварийными ситуациями на соляных рудниках, в том числе и на ВКМС [22].

Особенно актуальной проблема формирования моделей ПТС для получения новых сведений об ИГУ и оценки устойчивости ПТС становится в свете исчерпания запасов полезных ископаемых на участках с относительно простым геологическим строением. В связи с этим необходим переход к участкам месторождений, где риски встречи сложных инженерно-геологических условий и опасных процессов, и, как следствие, возникновения аварийных ситуаций будут только возрастать [88]. Очевидно, что в таких условиях недостаточно ограничиваться бурением скважин и выполнением геофизических работ по устоявшимся методикам, необходимо иметь систему высокотехнологичной и эффективной оценки и мониторинга состояния массивов горных пород, взаимодействующих с подземными сооружениями.

При подземных и наземных исследованиях самой высокой разрешающей способностью обладает георадар [81, 295], но наилучшим соотношением «разрешающая способность» / «дальность исследования» среди геофизических методов обладает шахтная сейсморазведка [57, 80, 189]. Её применение для изучения ИГУ и оценки устойчивости ПТС при проектировании и строительстве подземных сооружений на месторождениях солей вполне обосновано в силу значительного различия акустических свойств солей и вмещающих пород [38, 63, 302]. Однако, используемые на сегодняшний день методики во многом являются лишь переложением принципов наземной сейсморазведки к условиям шахт, и не дают ожидаемого результата. Таким образом, очевидна необходимость разработки новых подходов к выполнению подземных сейсмических исследований [90], обеспечивающих достоверность получаемых геофизических и геологических моделей, и тем самым повышающих безопасность строительства и эксплуатации подземных сооружений.

Для разработки нового эффективного высокоразрешающего метода шахтной сейсморазведки автору потребовалось провести значительный объем

численных экспериментов и физического моделирования для различных ИГУ [69, 92, 93, 102, 208–219, 220–222, 248, 249, 253]. Эксперименты позволили установить закономерности возбуждения, распространения и приема упругих колебаний в подземных условиях, установить взаимосвязи между характеристиками волнового поля и физическими свойствами грунтового массива.

2.2 Исследование закономерностей формирования, распространения и регистрации сейсмических волн в условиях полного пространства

2.2.1 О моделировании в сейсморазведке

Модель реального объекта или явления говорит о нем меньше, чем он есть в объективной действительности, но больше с точки зрения наших знаний о нем до конструирования модели. В связи с этим, модель и ее изучение способны приводить исследователя к новым знаниям и идеям, то есть к формированию более полного представления об изучаемом объекте [134]. Поэтому моделирование заняло прочное место в науке в целом, и в геофизике в частности [8, 14, 64, 66, 121, 140, 180, 202, 234, 294]. На сегодняшний день в геофизике подавляющее большинство моделей являются цифровыми, они формируются и исследуются с помощью специализированного программного обеспечения, функционирующего на базе различных вычислительных систем. Однако, численное моделирование имеет свои ограничения по полноте и точности отображения реальных природных процессов, в связи с чем физическое моделирование по-прежнему сохраняет свою актуальность. Поэтому, при наличии возможности, оно должно выполняться для подтверждения правильности выводов, сделанных на основе математических расчетов.

Процесс расчета теоретического волнового поля в сейсморазведке для сформированной модели называется решением прямой задачи, а получаемые в итоге расчетов данные – синтетическими или теоретическими сейсмограммами, или разрезами. Восстановление, или построение геофизической или геологической модели по волновому полю называется решением обратной задачи сейсморазведки. Сравнивая теоретическое волновое поле с зарегистрированным на практике, можно

оценить корректность сформированной модели, и, при необходимости, вносить в нее изменения, добиваясь минимально возможной погрешности подбора [34].

Кроме того, моделирование в сейсморазведке позволяет оценить закономерности распространения упругих волн, установить взаимосвязь между физическими свойствами грунтов и характеристиками волнового поля, спланировать опытные натурные исследования с учетом полученной информации, отработать подходы к регистрации и обработке полевых материалов, установить корректность новых подходов и методик с точки зрения адекватности моделей, восстанавливаемых в ходе решения обратной задачи, реальному геологическому строению.

Для решения перечисленных выше задач сейсмогеологические модели должны соответствовать ряду требований:

- Физические и/или механические свойства горных пород в модели, гипсометрия пластов, и другие геологические, петрофизические, гидрогеологические особенности должны соответствовать наблюдаемым в действительности.
- Детальность модели должна соответствовать разрешающей способности метода. Загрубление модели приводит к тому, что теоретическое волновое поле не будет соответствовать полю, наблюдаемому на практике, а излишняя детализация потребует кратного увеличения машинного времени на расчеты.
- Частота импульса должна соответствовать частоте фактически регистрируемых сигналов.

Разрешающая способность сейсморазведки при изучении слоистых сред характеризуется степенью детальности, с которой может быть произведено расчленение геологического разреза, она определяется как минимальное расстояние между двумя объектами (например, границами, соответствующими кровле и подошве пласта), на котором они еще различимы как два разных объекта, а не сливаются в один [34]. Определим вертикальную разрешающую способность шахтной сейсморазведки в условиях ВКМС на основе уравнения Вайдса:

$$R_v = \lambda/4, \lambda = V_{пл}/f,$$

где R_v – вертикальные размеры выделяемого в сейсмических записях объекта, λ – длина волны, $V_{пл}$ – пластовая скорость, f – преобладающая частота импульса.

Для оценки преобладающей частоты рассмотрим сейсмограмму, характерную для шахтных исследований на ВКМС (рисунок 17, а) и амплитудно-частотные спектры для продольных и поперечных волн (рисунок 17, б, в). На спектрах обоих типов волн четко выделяется по два максимума, первый из которых соответствует полезному сигналу, а второй – высокочастотному шуму. Частота первого максимума составляет примерно 700 Гц для продольных волн, и 500 Гц для поперечных волн, а скорость распространения порядка 4500 м/с и 2500 м/с соответственно (рисунок 17, а) [9].

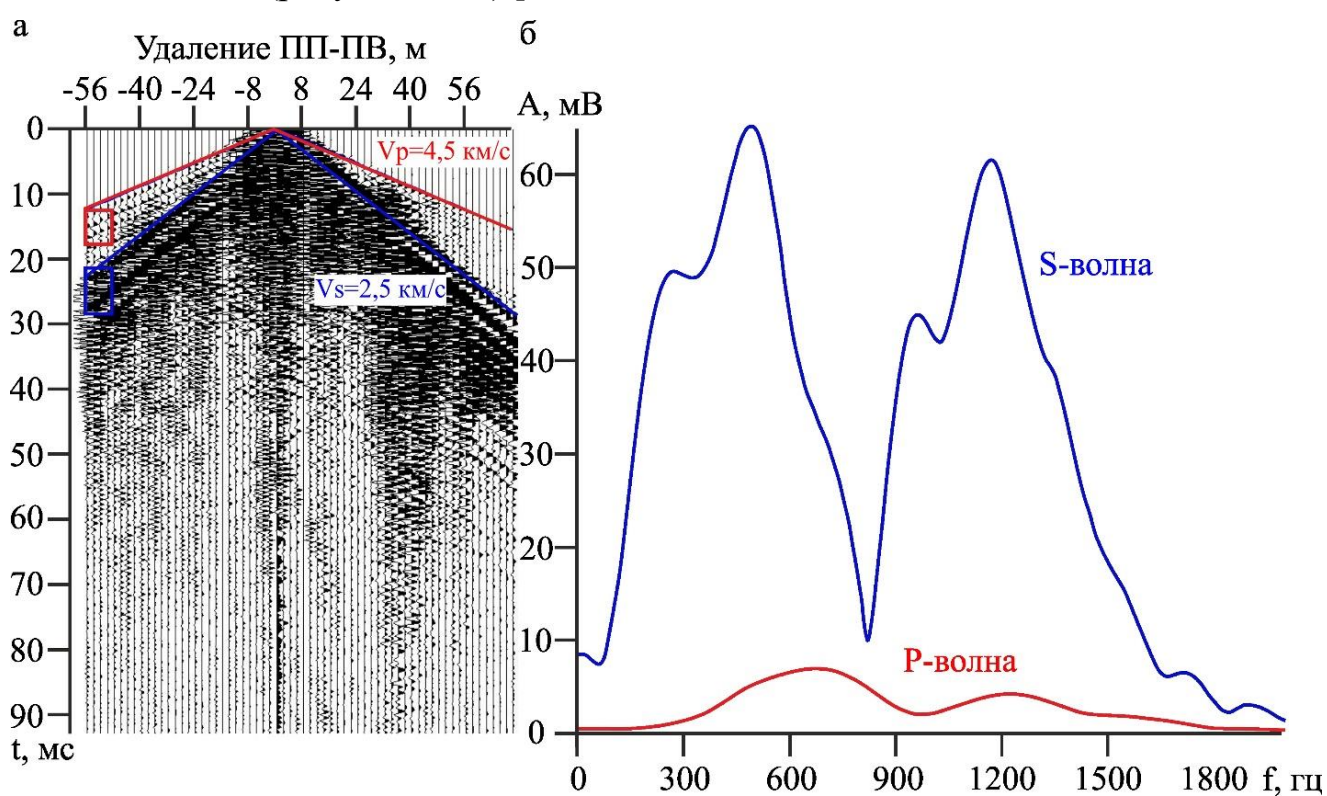


Рисунок 17 – Пример полевой сейсмограммы общего пункта возбуждения (а) и ее амплитудно-частотные спектр (б) (по данным автора [292])

С учетом информации о частоте и скорости распространения упругих волн, разрешающая способность в каменной соли на поперечных волнах составляет: $R_{BS} = (2500/500)/4 = 1,25$ м, а на продольных волнах $R_{BP} = (4500/700)/4 = 1,61$ м. Можно сделать промежуточный вывод, что ожидаемая разрешающая способность на

поперечных волнах несколько выше, чем на продольных.

Приведенные расчеты показывают, что для детального изучения закономерностей распространения упругих волн в условиях тонкослоистой соляной толщи ВКМС необходима детальность задания модели от десятых долей метра до одного метра. В частности, такая детальность нужна для изучения особенностей отражения упругих волн и их интерференции от тонкослоистых геологических толщ, влияния слоистости на амплитудно-частотный спектр регистрируемых сигналов, соотношения амплитуды продольных и поперечных волн. Для изучения же особенностей формирования отражений от границ ИГЭ мощностью от метра и более, детальность задания модели должна составлять порядка одного метра, это же относится к минимальной мощности ИГЭ, закладываемых в модель.

Согласно приведенным выводам, модели соляной толщи условно можно разделить на два типа – «тонкослоистые», с детальностью порядка 0,1 м, и «толстослоистые», с мощностью целевых пластов от одного метра и более.

Теория распространения упругих волн основывается на теории упругости, поскольку горные породы в первом приближении можно считать упругими. Основные уравнения динамики упругой среды рассмотрены ниже.

Основные законы динамики упругой среды. Основные уравнения. Уравнения движения для пространственного случая имеют вид [162, 181, 227]

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} - \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

где u_i – компоненты вектора перемещения; σ_{ij} – компоненты тензора напряжений; ρ – плотность; x_j – пространственные координаты; по индексу «j» идет суммирование от 1 до 3.

Закон Гука для анизотропного тела в общем случае имеет вид:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} = \frac{1}{2} C_{ijkl} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_k} \right) \quad (2)$$

где ε_{kl} – компоненты тензора деформаций; C_{ijkl} – тензор жесткости упругой среды 4-го ранга.

Подставив соотношения (2) в уравнения (1) получим уравнения движения анизотропной упругой среды, выраженные в перемещениях:

$$C_{ijkl}(\frac{\partial^2 u_k}{\partial x_l \partial x_j} + \frac{\partial^2 u_l}{\partial x_k \partial x_j}) - \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = 0 \quad (3)$$

Соответствующие уравнения для изотропной упругой среды (уравнения Лямэ) имеют вид:

$$(\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial x_i} + \mu \Delta u_i - \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = 0 \quad (4)$$

где λ, μ – параметры Лямэ; $\theta = \varepsilon_{ii}$ – объемная деформация (сумма главных деформаций ε_{ii}); Δ – оператор Лапласа.

Граничные условия в напряжениях выглядят как:

$$\sigma_{ij} n_j = p_i^* \quad x_i \in S_\sigma \quad (5)$$

где S_σ – часть поверхности тела, на которой заданы поверхностные нагрузки; n_j – компоненты вектора нормали к поверхности S_σ ; p_i^* – компоненты вектора поверхностных распределенных нагрузок.

Граничные условия в перемещениях записываются в форме:

$$u_i = u_i^* \quad x_i \in S_u \quad (6)$$

где S_u – часть поверхности тела, на которой заданы перемещения u_i^* .

Для динамической задачи требуется сформулировать также начальные условия. Как правило, это условия начального ненапряженного состояния и отсутствие каких-либо перемещений (скоростей) в объеме Ω тела:

$$\sigma_{ij} = 0, \quad v_i = 0, \quad u_i = 0 \quad x_i \in \Omega \quad (7)$$

Типы волн. Скорости распространения волн. Можно выделить два основных типа волн в общем пространственном случае изотропной среды, описываемой уравнениями (4).

А. Волны искажений (поперечные волны) реализуются при условии отсутствия объемной деформации $\theta = 0$, описываются уравнениями

$$\mu \Delta u_i - \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = 0 \quad (8)$$

Б. *Безвихревые волны (продольные волны)* реализуются при условии отсутствия жесткого поворота частиц среды $\omega_{jk} = \frac{1}{2}(\frac{\partial u_j}{\partial x_k} - \frac{\partial u_k}{\partial x_j})$, описываются уравнениями:

$$(\lambda + 2\mu) \Delta u_i - \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = 0 \quad (9)$$

Общий вид решения для плоской волны.

Решение типа бегущей волны для общего случая динамики анизотропной среды (3) ищется в виде [162]

$$u_i = U_i(Vt - n_s x_s), \quad (10)$$

где V – скорость распространения возмущения вдоль направления единичного вектора с координатами n_s .

Подставляя (10) в (4) и требуя существование подобного решения (типа волны), получим необходимые условия для этого в виде:

$$\left\| \frac{1}{2} C_{ijkl} (n_i n_j \delta_{ks} + n_k n_j \delta_{is}) - \rho V^2 \delta_{is} \right\| = 0 \quad (11)$$

Для изотропного случая аналогичное условие имеет вид:

$$\|(\lambda + \mu)n_s n_i + (\mu - \rho V^2)\delta_{is}\| = 0 \quad (12)$$

Соотношение (12) в частности означает, что решение в виде (10) может существовать только для определенных значений скоростей волны V . А именно, продольная волна реализуется при:

$$V = V_p = \sqrt{\frac{K + (4/3)G}{\rho}}, \quad (13)$$

а поперечная при:

$$V = V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad (14)$$

где K – объемный модуль; G – модуль сдвига.

В (2.13), (2.14) мы перешли от параметров Лямэ к техническим постоянным.

Следует различать также скорость распространения волны в стержне (образце), имеющем незначительные поперечные размеры по сравнению с длиной:

$$V_{ст} = \sqrt{E/\rho}, \quad (15)$$

где E – модуль упругости.

Очевидно, что скорость продольной волны в безграничной среде V_p (одноосная деформация) больше скорости волны в стержне $V_{ст}$ (одноосное напряжение):

$$V_p = \sqrt{\frac{K + (4/3)G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \geq V_{ст}, \quad (16)$$

где μ – здесь и ниже (в отличие от (2.4), (2.8), (2.9), (2.12)) коэффициент Пуассона.

Отношение скоростей $V_p/V_{ст} = \sqrt{\frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}} \geq 1$. Например, при $\mu = 0$, $\frac{V_p}{V_{ст}} = 1$; при $\mu = 0,3$ $\frac{V_p}{V_{ст}} = 1,16$; при $\mu = 0,4$ $\frac{V_p}{V_{ст}} = 1,46$; при $\mu = 0,45$ $\frac{V_p}{V_{ст}} = 1,95$.

Таким образом, с ростом коэффициента Пуассона горной породы отличие в скоростях продольной волны для пространства и стержня может составлять от 10% до 100%.

Кроме продольных волн и поперечных волн (волн сдвига), распространяющихся со скоростью V_p (13) и V_s (14) существуют и объемные волны, распространяющиеся со скоростью V_K :

$$V_K = \sqrt{\frac{K}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-2\mu)}} \quad (17)$$

Очевидно, что:

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{2(1-\mu)}{1-2\mu}} \geq \sqrt{2} \quad (18)$$

Например, при $\mu = 0$, $\frac{V_p}{V_s} = 1,41$; при $\mu = 0,3$ $\frac{V_p}{V_s} = 1,87$; при $\mu = 0,4$ $\frac{V_p}{V_s} = 2,45$; при $\mu = 0,45$ $\frac{V_p}{V_s} = 3,32$.

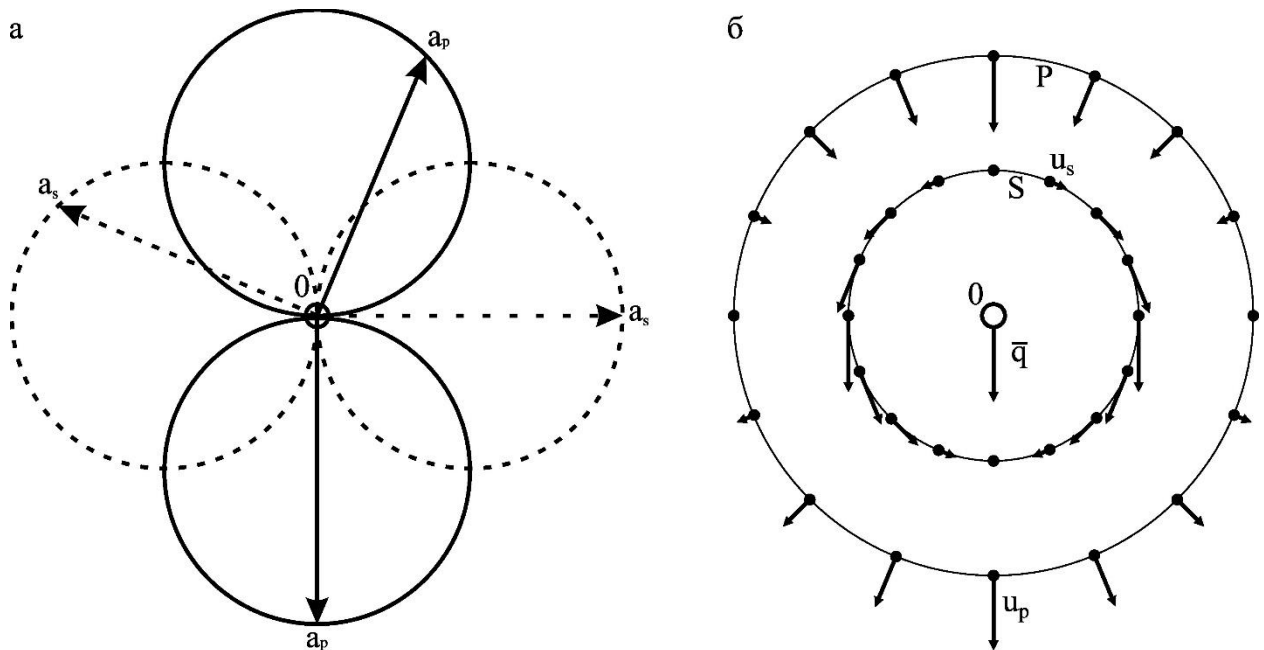
Таким образом, с ростом коэффициента Пуассона горной породы отличие в скоростях продольной волны для пространства и поперечной волны может составлять от 40 % до 200 % и более.

Отношение скорости продольной и объемной волны для пространства

$$\frac{V_p}{V_K} = \sqrt{\frac{3(1-\mu)}{1+\mu}} \geq 1 \quad (19)$$

Но в отличие от предыдущих вариантов максимальное отношение здесь достигается при $\mu = 0$: $\frac{V_p}{V_K} = \sqrt{3} = 1,73$; с ростом μ отношение $\frac{V_p}{V_K}$ падает до единицы.

Направленность идеального источника в однородной безграничной среде. Базовой информацией для изучения направленности *реального* источника упругих волн в условиях соляных шахт являются сведения о направленности *идеального* источника сосредоточенной силы в однородной безграничной среде (рисунок 18, а) [34, 297].



Условные обозначения

a_s – амплитуда смещений S-волны

P – фронт продольной волны

a_p – амплитуда смещений S-волны

u_s – поле смещений во фронте S-волны

$\bar{q}$ – сила источника, действующая на породу

u_p – поле смещений во фронте P-волны

S – фронт поперечной волны

O – точка приложения силы

Рисунок 18 – Характеристика направленности идеального источника P и S волн типа сосредоточенной силы в однородной безграничной среде (а), распространение продольной и поперечной волн и смещение в них частиц среды для источника типа сосредоточенной силы (б) (по данным [34])

Характеристика направленности источника – это зависимость амплитуд смещений на изофазовых поверхностях возбуждаемых волн от направления их распространения. Эти характеристики удобно представлять в виде полярных диаграмм. Источник типа сосредоточенной силы, действующей вдоль оси Z , обладает осевой симметрией характеристик направленности для обеих излучаемых волн – P и S. В трехмерном пространстве вектор сосредоточенной силы лежит в экваториальной плоскости в объеме напоминающий две сферы, примыкающих в точке расположения источника P волны и перпендикулярно к экваториальной плоскости тора характеристики S волны. В сечении вертикальной плоскости по оси Z обе характеристики направленности изображаются двумя соприкасающимися окружностями: в случае P волны их центры расположены на оси Z , в случае S волны – на ортогональном к Z направлении [34].

Обе волны распространяются в объемах сферических слоев (рисунок 18, б), толщины, которых прямо пропорциональны соответствующей скорости. На достаточно большом удалении от источника, области существования волн Р и S разделяются в пространстве свободной от колебаний областью. В полярных точках изофазовых поверхностей ($\gamma = 0^\circ$) Р волна имеет максимальную амплитуду, а S волна – нулевую амплитуду. В экваториальных точках изофазовых поверхностей ($\gamma = 90^\circ$) соотношение интенсивностей волн обратное. При равных удалениях от источника максимальные амплитуды поперечной волны превосходят максимальные амплитуды продольной волны, поскольку эти величины обратны значениям V_s^2 и V_p^2 соответственно.

2.2.2 Численное моделирование для различных ИГУ

Исходя из теоретических основ и практики сейсморазведки следует, что тонкие пропластки и складки первого порядка при характерной для шахты длине сейсмической волны будут оказывать влияние в основном на эффекты интерференции, а пласты мощностью от метра и более, а также складки второго и третьего порядка будут проявляться, в первую очередь, в форме годографов отраженных волн с различными искажениями. В связи с этим, для глубокого понимания возможностей формирования геофизических моделей ПТС в условиях горнопромышленных территорий необходимо детально изучить закономерности распространения сейсмических волн как для «тонкослоистых», так и для «толстослоистых» моделей.

Численное моделирование для «тонкослоистой» модели. Задачи, стоящие перед исследованиями на «тонкослоистой» модели:

- изучение принципиальной возможности получения отражений от пластов в силвинитовой и карналлитовой зонах в условиях тонкослоистой среды, характерной для соляного месторождения, в том числе ВКМС;
- определение разрешающей способности шахтной сейсморазведки на продольных и поперечных волнах;
- изучение спектрального состава волнового поля;
- изучение соотношения амплитуды продольных и поперечных отраженных волн в условиях тонкослоистой среды.

Исходной информацией для построения тонкослоистой модели среды послужила геологическая колонка и результаты акустического каротажа (АК) по имеющимся скважинам. Модель построена в двух вариантах, со скоростями S-волн (рисунок 19) и Р-волн (рисунок 20), волновые поля рассчитаны для каждой модели по отдельности [292].

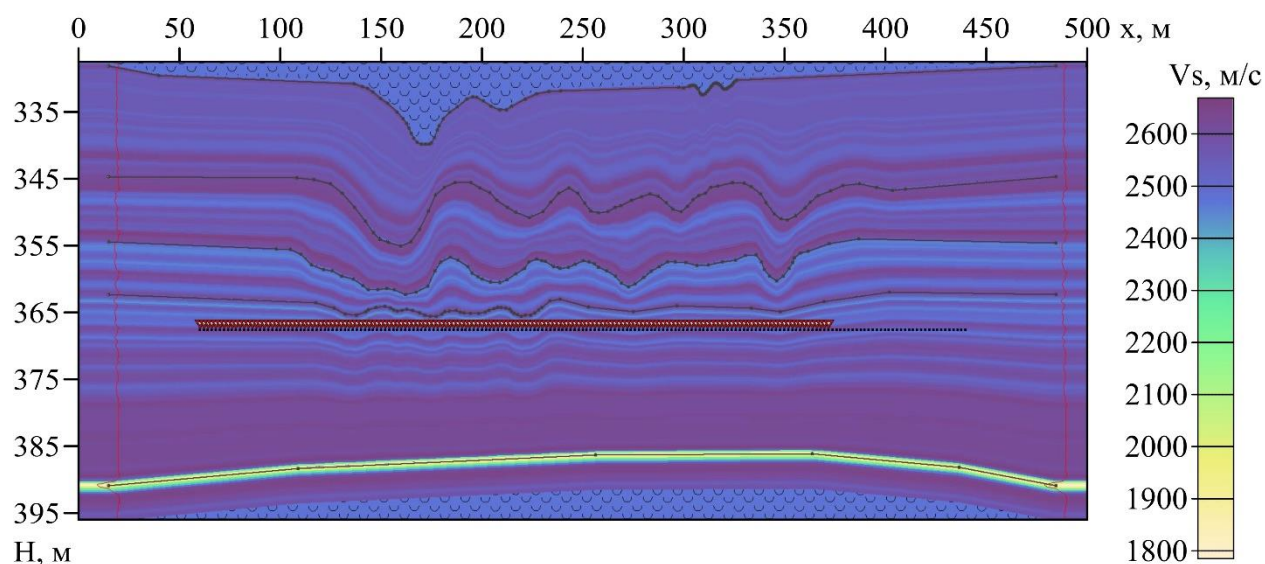


Рисунок 19 – Тонкослоистая складчатая модель соляной залежи по данным АК (скорости поперечных волн, по данным автора [292])

Такой подход выбран для того, чтобы была возможность исследовать особенности распространения и характеристики двух разных типов волн независимо друг от друга, иначе это сделать было бы практически невозможно в силу интерференции волн разных типов. Регистрирующая расстановка расположена в горизонтальной выработке на глубине 367,5 м. В модели заложены складчатые структуры различного размера, их амплитуда изменяется от 1 до 10 м, а горизонтальные размеры – от 10 до 80 м, что соответствует фактической обстановке на ВКМС.

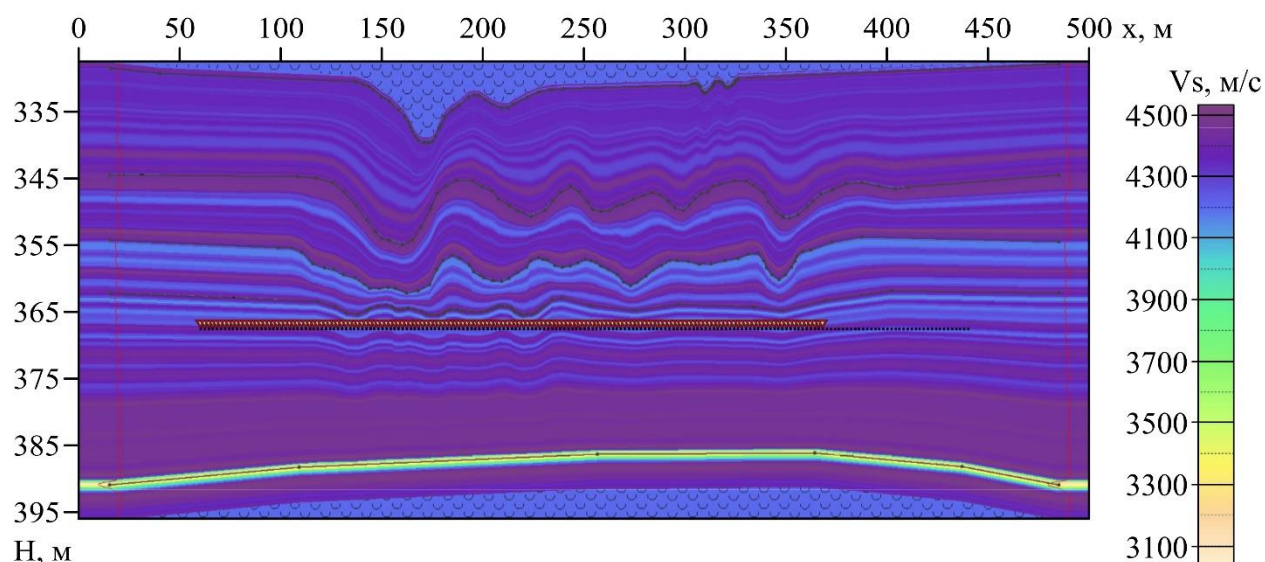


Рисунок 20 – Тонкослоистая складчатая модель соляной залежи по данным АК (скорости продольных волн, по данным автора [292])

В процессе моделирования использована система наблюдений идентичная той, что применяется при полевых шахтных сейсморазведочных работах методом отраженных волн по методике общей глубинной точки ((МОВ МОГТ) на ВКМС. Основные параметры расчетов:

- Размеры модели – длина 500 м, интервал глубин 325–395 м;
- Детальность разбиения слоев по АК – 0.1 м;
- Шаг пунктов возбуждения (ПВ) и пунктов приема (ППр) - 2 м;
- Сигнал – импульс Риккера типа Single (простой), центральная частота сигнала 500 Гц для поперечных волн и 700 Гц для продольных
- Длина участка возбуждения и регистрации - 382 м, размещен по центру модели для исключения влияния краевых эффектов;
- Шаг дискретизации - 0,25 мс;
- Длина записи – 128 мс.

Поскольку модель очень детальная, для достижения разумного расчетного времени интервал глубин для построения модели выбран относительно небольшим, в него вошли КП, СП, и верхняя часть ПдКС, включая пласт маркирующей глины (МГ).

В качестве инструмента для решения прямой задачи выбрано конечно–разностное численное моделирование [8], которое позволяет точно имитировать все сейсмические эффекты прохождения волнового поля для

мультипараметрической, гетерогенной и геологически реалистичной модели среды. Моделирование выполнено в программе Tesserai, которая позволяет осуществлять расчет полного сейсмического поля [322].

В результате расчета теоретического волнового поля получены синтетические сейсмограммы (рисунок 21), которые далее обрабатывались в программе RadExPro [317]. Спектры Р и S волн в целом имеют одинаковую ширину, которая составляет порядка 1400 Гц. На синтетических сейсмограммах, как и на реальных, отмечаются прямые волны, отражения от большого числа границ, высокочастотный шум, вызванный колебаниями пород вокруг выработки, и эффекты интерференции всех названных волн.

Абсолютные значения амплитуд прямой S волны выше в среднем в 5 раз, чем прямой Р волны, что также хорошо согласуется с реальными шахтными исследованиями (см. выше рисунок 17).

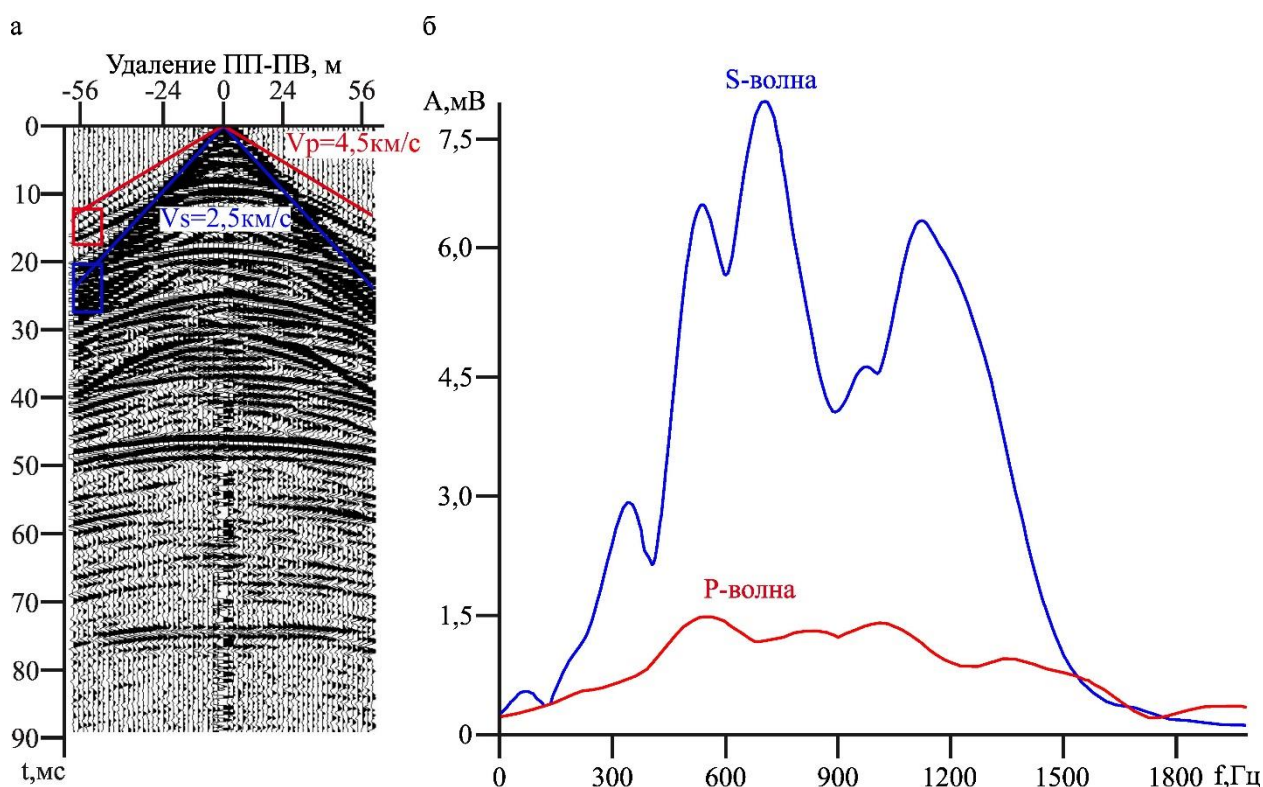


Рисунок 21 – Пример синтетической сейсмограммы ОПВ, полученной по результатам моделирования (а) и амплитудно-частотные спектры прямой Р и прямой S волн (б) (по данным автора [292])

В результате обработки сейсмограмм, полученных при решении прямой задачи для тонкослоистой среды построены глубинные геофизические разрезы

(рисунок 22, а, б). Четкость и протяженность основных отражений от геологических границ на S волнах значительно выше. При равной ширине частотного спектра вертикальная разрешающая способность у поперечных волн выше чем у продольных за счет значительно меньшей скорости их распространения.

Кроме того, на геофизических разрезах наблюдается интерференция (наложение) отражений, приходящих из верхнего и нижнего полупространства, а также кратные волны от условной поверхности и от низкоскоростного слоя ниже линии наблюдения. Спектры пространственных частот (рисунок 22, в) показывают, что длина волны у поперечных волн меньше, что говорит об их большей разрешающей способности.

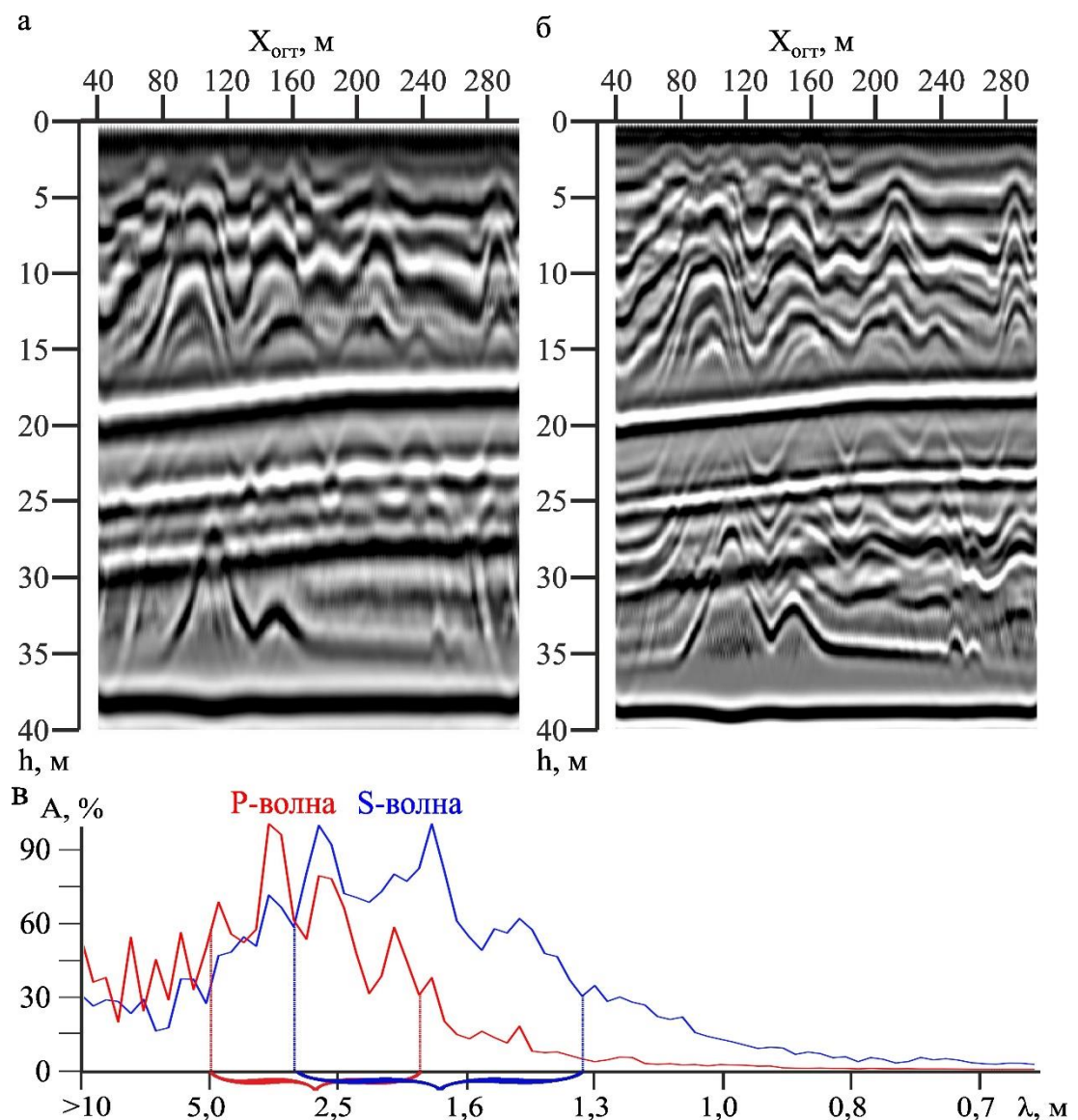


Рисунок 22 – Результаты моделирования (а – глубинный разрез по Р-волнам; б – глубинный разрез по S-волнам; в – спектры длин волн) (по данным автора [292])

Ниже представлен фрагмент «тонкослоистой» модели (рисунок 23, а), представленной ранее (рисунок 19), и итоговые геофизические разрезы для него после полноценной обработки (рисунок 23, б, в). На синтетическом разрезе S-волн (рисунок 23, б) хорошо прослеживаются основные отражения от геологических границ с детальностью, соответствующей исходной модели. Так, четко идентифицируются складки с амплитудой от 1–2 метров и более, что говорит о том, что использование поперечных волн должно позволять фиксировать структурные особенности разреза начиная с указанных размеров. На разрезе Р-волн геологическое строение модели в целом отображается, но слои мощностью 1–2 метра неразличимы, можно выделить интервалы мощностью от 2–3 метров (рисунок 23, в).

Таким образом, по итогам моделирования для тонкослоистых моделей среды можно сделать следующие выводы:

- показана принципиальная возможность построения по данным шахтной сейсморазведки детальных моделей сильвинитовой и карналлитовой зон в условиях тонкослоистой среды, характерной для соляной толщи ВКМС;
- изучен спектральный состав волнового поля, ширина спектра составляет порядка 1400 Гц, для обоих типов волн;
- определена разрешающая способности шахтной сейсморазведки, она составляет 1–2 м для поперечных волн и 2–3 м для продольных волн;
- изучено соотношение амплитуды продольных и поперечных отраженных волн в условиях тонкослоистой среды, *по результатам моделирования* амплитуда поперечных волн превышает амплитуду продольных примерно в 5 раз, в реальности же, как будет показано далее, это соотношение достигает 10 и более раз;
- изучение особенностей поля отраженных волн, формируемых на геологических структурах, характерных для месторождений солей, в том числе на пластах мощностью от 1 м и более, а также на складках второго и третьего порядков;
- исследование направленности источника типа «сосредоточенная сила» при возбуждении колебаний в горной выработке.

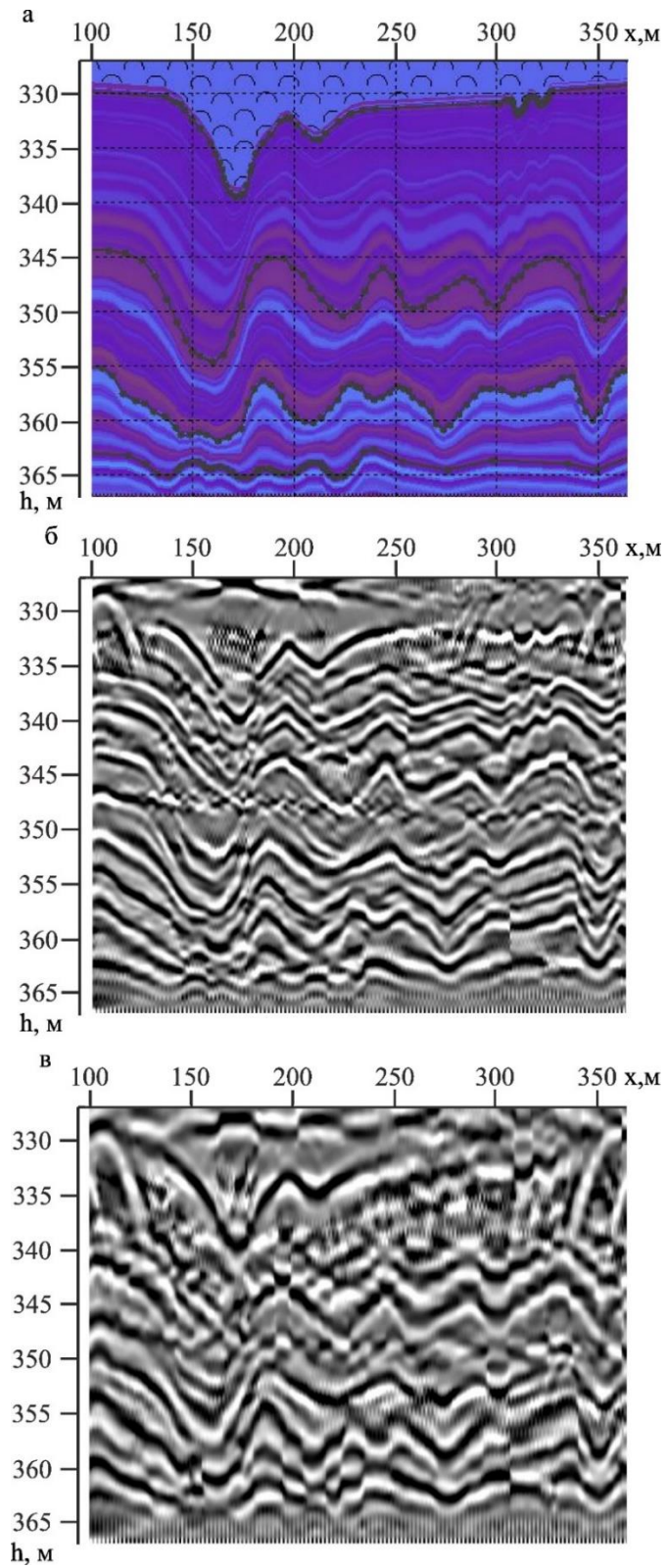


Рисунок 23 – Результат сейсмического моделирования: а – тонкослоистая модель; б – синтетический разрез на S волнах; в – синтетический разрез на P волнах (по данным автора [292])

Численное моделирование для «толстослоистых» моделей. Задачи, стоящие перед исследованиями на «толстослоистых» моделях:

Изучение особенностей поля отраженных волн. При выполнении шахтных сейсморазведочных работ в условиях ВКМС на временных разрезах отмечается большое количество искажений (рисунок 24, а). Эти искажения вызваны дифракцией и сейсмическим сносом, проявляющимся при выполнении сейсморазведки МОВ МОГТ на участках с наклонным или более сложным залеганием отражающих границ [269]. Сейсмический снос – это несовпадение проекции на поверхность точки отражения с точкой наблюдения соответствующей волны [34, 302].

Для устранения эффекта сейсмического сноса и дифракции используется процедура миграции, восстанавливающая истинное положение отражающих границ (рисунок 24, б).

Известно несколько интересных и важных явлений, к которым приводит сейсмический снос и дифракция:

1. Смещение наклонной границы в сторону от своего истинного положения, с одновременным удлинением и уменьшением ее угла падения.
2. Появление петель на годографах и суммарных разрезах над синклинальными складками.
3. Появление годографов дифрагированных волн над контрастными объектами с размерами, сопоставимыми с длиной волны.
4. Искажение годографов над антиклинальными складками.

В учебной и методической литературе [33, 34, 38, 254, 302] наиболее полно рассматриваются явления 2 и 3, остальным же двум оказано значительно меньше внимания, причем отражение от антиклинальных складок кое-где вообще упоминается лишь вскользь, без соответствующих иллюстраций.

Материалы, получаемые при выполнении шахтных сейсморазведочных работ в условиях изучения Верхнекамского месторождения солей, отличаются наличием большого количества искажений, вносимых сейсмическим сносом и дифракцией (рисунок 24, а). Анализ указанных материалов привел к выводу, что на шахтных разрезах широко представлены все четыре описанных выше явления.

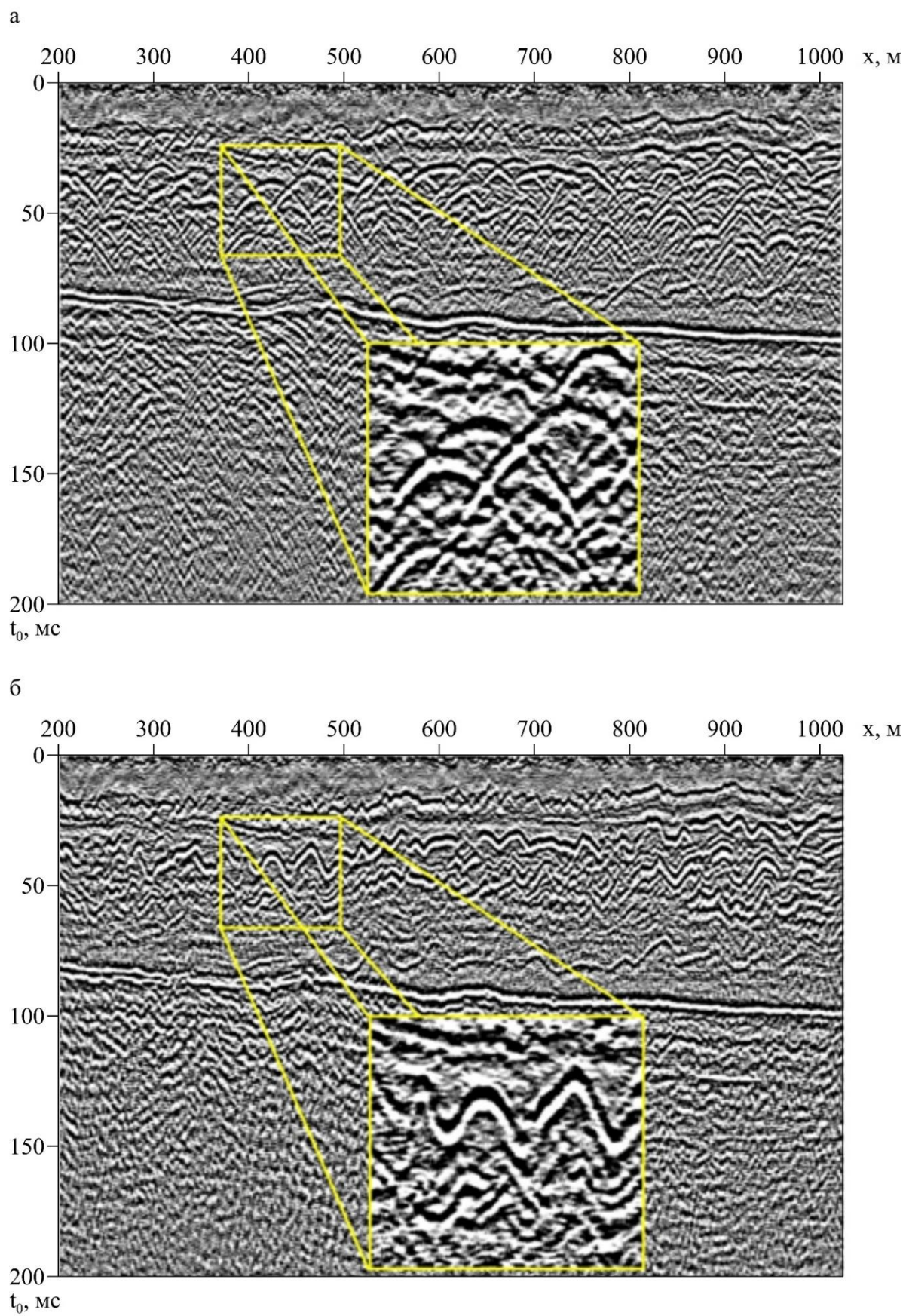


Рисунок 24 – Шахтный временной разрез ОГТ: а – до миграции; б – после миграции (по данным автора [221])

При этом первоначально, до рассматриваемого здесь анализа, предполагалось, что над синклинальными складками образуются петли, а над антиклинальными в основном формируются дифрагированные волны. Предполагалось, что последние возникают в силу специфической формы антиклинальных складок, приводящих к рассеянию отраженных волн по аналогии с локальными объектами. Однако, в ходе обсуждения результатов шахтных работ на конференциях и семинарах ряд коллег выразил сомнение, что при условиях, характерных для ВКМС, на шарнирах антиклинальных складок могут образоваться дифрагированные волны. Чтобы подтвердить первоначальные предположения или опровергнуть их, были выполнены детальные исследования особенностей формирования отражений в условиях складчатости, наблюдаемой на ВКМС [221].

Известно, что появление дифрагированных волн возможно в случае, когда длина волны и размеры отражающего объекта сопоставимы. Количественная оценка характеристик складок привела к выводу о том, что длина волны значительно меньше размеров замков большинства складок, на которых образуются годографы волн, первоначально принятых за дифрагированные.

Так, на мигрированных разрезах видно (рисунок 24, б), что длина складок, на которых возникают указанные годографы, составляет от первых десятков до 100 м, а высота – до 25 м (при $V_s=2500$ м/с), при этом большинство складок довольно пологие, без резких перегибов, которые могли бы послужить источником дифрагированных волн. Длина поперечной волны в условиях шахт ВКМС оценивается по известной формуле: $\lambda = V_s/f = 2500/(300 \div 500) = 5 \div 8,3$ м, то есть размер замков складок превышает длину волны в несколько раз. Таким образом, идентификация годографов, формирующихся на характерных для ВКМС складках, как годографов дифрагированных волн, в большинстве случаев будет некорректной.

Для уточнения природы рассматриваемых годографов выполнен расчет нормально падающих лучей для трех простых моделей – модели с горизонтальной отражающей границей и локальной неоднородностью (рисунок 25, а), модели с горизонтальной отражающей границей с синклинальной складкой (рисунок 25, б), модели с горизонтальной отражающей границей с антиклинальной складкой

(рисунок 25, в). Длина складок для рассматриваемых моделей, принята равной 50 м, высота – 10 м.

В случае с первой моделью ожидаемо возникает дифрагированная волна от локальной неоднородности, а также получено отражение от горизонтальной границы (рисунок 25, а). В случае с синклинальной складкой закономерно получена петля на годографе (рисунок 25, б). Самый же интересный результат получен для случая с антиклинальной складкой.

Поскольку в качестве отражающей границы рассматривалась не одиночная антиклинальная складка, у которой нет продолжения, как это сделано, например, в [254], а складка, переходящая в горизонтально залегающую границу, годограф отраженной волны (рисунок 25, в) для нормально падающих лучей оказался не просто растянутым, а очень похожим по форме на годограф дифрагированной волны (рисунок 25, а).

Особенно хорошо данный эффект замечен при совмещении годографов для всех трех моделей (рисунок 25, г). Очевидно, что зрительно годографы для модели локальной неоднородности (желтые ромбы) и для модели антиклинальной складки (красные треугольники) едва различимы по форме, основным видимым отличием является наличие петель, формируемых на подножьях антиклинальной складки. Интересно, что о возможности образования петель на годографах в случае антиклинальных складок в приведенных литературных источниках не упоминается. Причиной их возникновения в рассматриваемом случае является наличие фокусирующих участков у подножья антиклинальной складки, по сути представляющих из себя небольшие наклонные синклинальные складки (рисунок 25, в).

Очевидно, что петли на подножьях антиклинальных складок значительно менее выразительны, чем на синклинальных складках, поэтому на теоретических годографах они различимы хорошо, а на реальных сейсмических разрезах идентифицировать их значительно сложнее (рисунок 22, а). Более того, на разрезах, аналогичных рассматриваемому на рисунке 9, по той же самой причине далеко не всегда можно зрительно идентифицировать даже петлю, соответствующую вполне выразительной синклинальной складке, что можно считать основной причиной некорректности первоначальных предположений авторов о природе

рассматриваемых искажений.

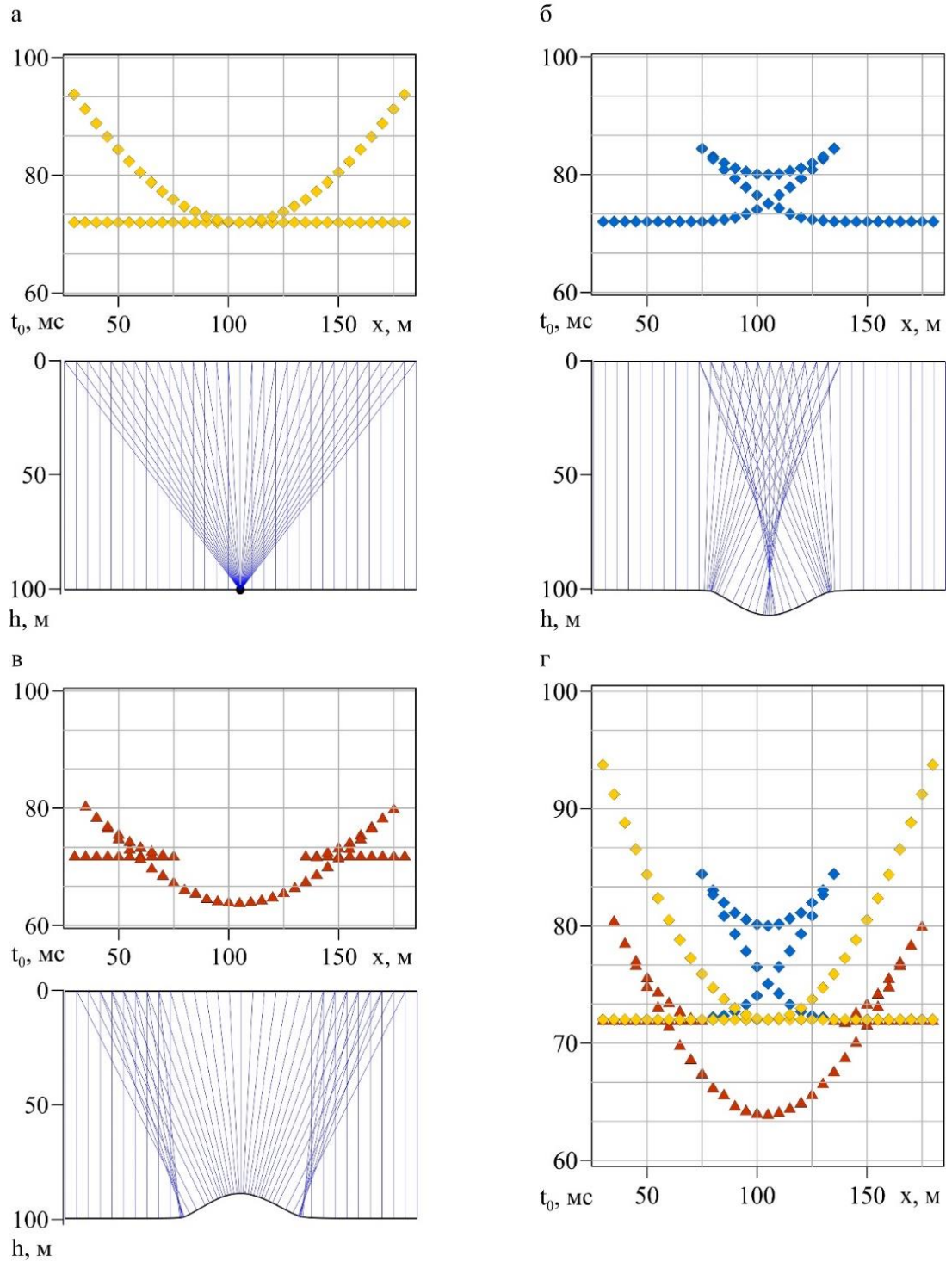


Рисунок 25 – Модель с горизонтальной границей и локальной неоднородностью, и отклик по нормально падающим лучам для нее (а), модель с горизонтальной границей и синклинальной складкой, и отклик по нормально падающим лучам для нее (б), модель с горизонтальной границей и антиклинальной складкой, и отклик по нормально падающим лучам для нее (в), совмещенные годографы для моделей а–в (г) (по данным автора [221])

Для оценки ошибок, которые могут возникнуть из-за некорректных выводов о причинах искажений на сейсмических разрезах, было выполнено сейсмическое моделирование в программе Tesseral Pro. Модель сформирована на основе реального временного разреза (рисунок 24, б), а для гарантированного возникновения дифрагированных волн в модель добавлено восемь локальных неоднородностей на различной глубине (рисунок 26, а).

Расчеты выполнены со следующими параметрами: количество пунктов приема (ПП) в приемной расстановке = 96, шаг ПП = 2 м, шаг пунктов возбуждения 4 м, частота импульса 500 Гц. Оценка скоростей по наиболее удаленным от линии наблюдения годографам с помощью аппроксимации по закону для дифрагированных волн дала следующие результаты (рисунок 26, б):

1. Скорость по годографам дифрагированных волн равна 2490 м/с, что практически точно соответствует фактической средней скорости до дифрагирующего объекта.
2. Скорость по годографам, соответствующим отражениям от антиклинальных складок завышена, и составляет 2870 м/с, что на 15% выше фактической средней скорости.
3. Скорость по годографам, соответствующим отражениям от синклинальных складок занижена, и составляет 1920 м/с, что на 23% ниже фактической средней скорости.

Из приведенных данных следует, что некорректная идентификация природы отражений, наблюдаемых на суммарных разрезах в условиях складчатости, и дальнейшее использование полученных по ним оценок скоростей приведет к значительному их разбросу относительно фактических значений, как в большую, так и в меньшую сторону. Для того, чтобы избежать подобной ситуации, наиболее надежным выходом является применение миграционного преобразования, корректное использование которого позволяет восстановить истинное положение отражающих границ сложной формы и источников дифракции.

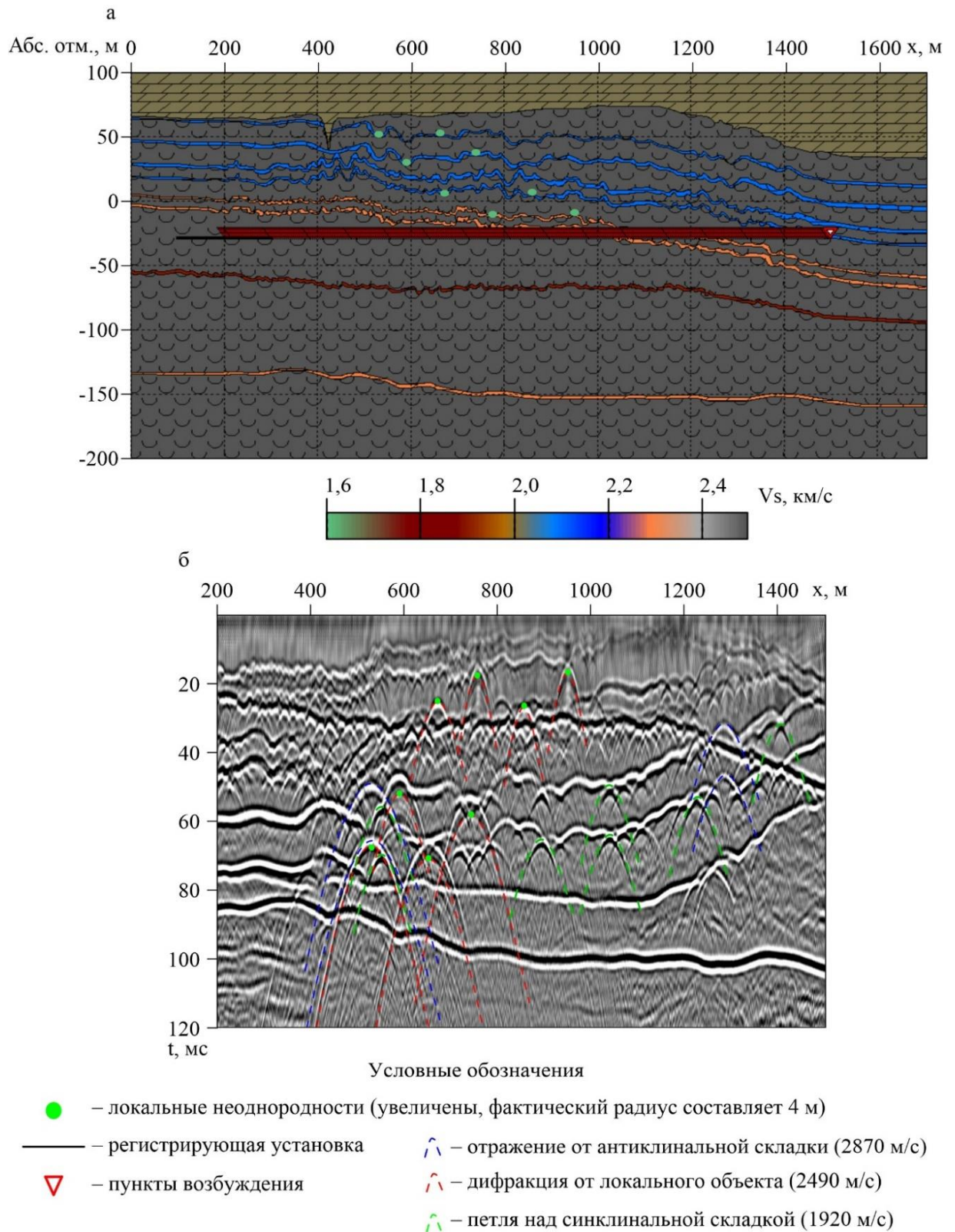


Рисунок 26 – Слоистая сейсмогеологическая модель со складками, характерными для ВКМС (а), и временной разрез для нее (б). Годографами выделены все дифракции от неоднородностей и некоторые из отражений от складок (по данным автора [221])

Так, после применения процедуры миграции к разрезу, приведенному выше (рисунок 26, б), отражения, искаженные сейсмическим сносом, полностью восстановились, приняв форму, адекватную соответствующим отражающим границам модели, а годографы дифрагированных волн преобразовались в локальные объекты (рисунок 27). Дальнейшее совмещение разрезов до миграции и после миграции позволяет практически однозначно идентифицировать природу наблюдаемых искажений.

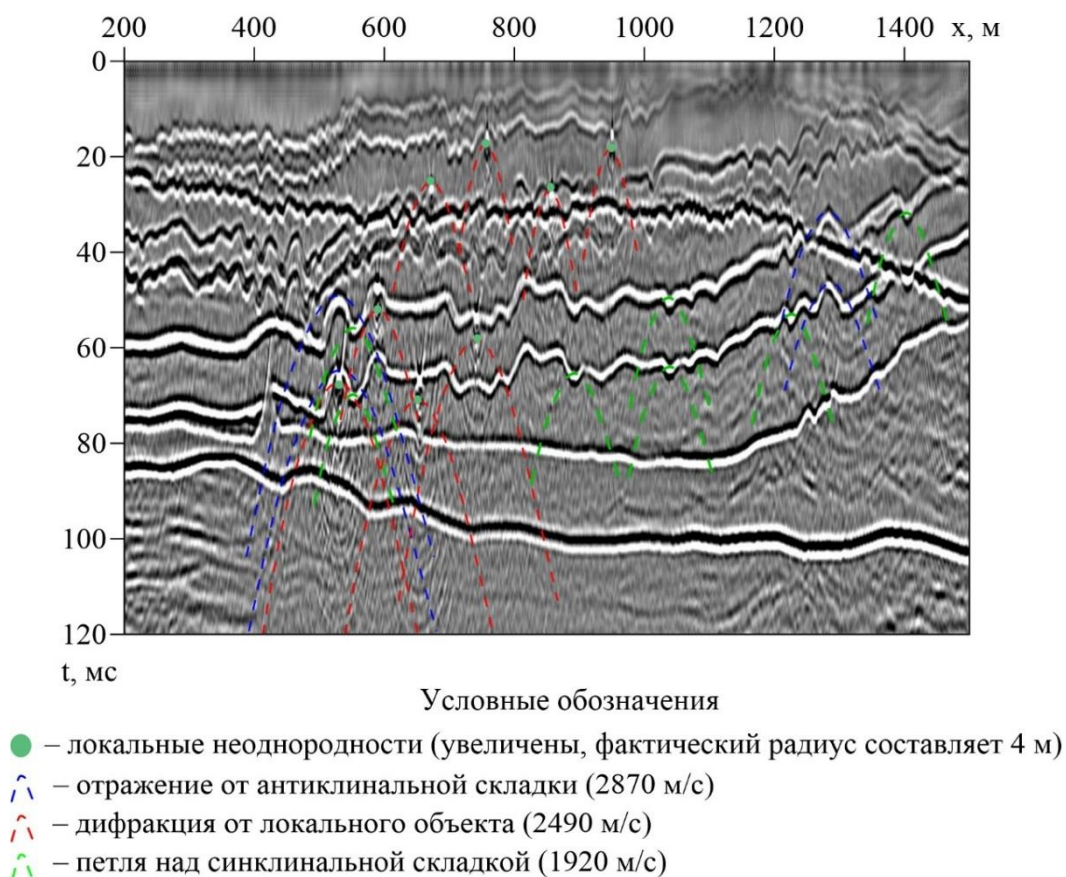


Рисунок 27 – Временной разрез с рисунка 13, б, после миграции (по данным автора [221])

Таким образом, складчатость, характерная для солей приводит к появлению на суммарных разрезах петель на годографах, дифракций от локальных объектов, а также к формированию отражений, формирующихся на антиклинальных складках, но визуально очень похожих на годографы дифрагированных волн. Также на годографы дифрагированных волн зачастую похожи и петли, формирующиеся над синклинальными складками. Определение скоростей с помощью аппроксимации по закону для дифрагированных волн при некорректной

идентификации рассмотренных отражений приводит к значительным ошибкам в получаемых оценках. Отличить данные отражения от дифракций возможно по результатам применения миграции с корректным скоростным законом, и сравнения мигрированного разреза с разрезом до миграции, после чего появляется возможность корректной оценки скоростей по годографам дифрагированных волн.

Исследования направленности источника типа «сосредоточенная сила» при возбуждении колебаний в горной выработке. Важным аспектом при исследованиях горного массива с помощью упругих волн является четкое понимание о направленности используемого источника.

Поскольку все без исключения шахтные сейсморазведочные исследования на ВКМС выполняются с помощью ударного источника, иначе называемого как источник типа «сосредоточенная сила», то исследования направленности выполнены только для него. С учетом данного факта, шахтные исследования будут коренным образом отличаться от наземных работ следующими особенностями, которые необходимо учитывать при разработке новых методик работ:

- шахтные исследования выполняются в условиях полного пространства, а значит упругие колебания, возбуждаемые источником, будут распространяться и в нижнем и в верхнем полупространстве;

- источник типа «сосредоточенная сила» значительно отличается по направленности от всенаправленного источника, например, взрывного.

Исследования направленности источника были выполнены с помощью пакета ANSYS [306]. Указанный пакет позволяет решать различные классы задач механики сплошных сред, в том числе и моделировать процессы распространения упругих волн в различных средах, что дает возможность теоретически подтвердить результаты, получаемые в ходе выполнения практических исследований.

В процессе исследований [208] рассматривался идеально упругий изотропный (однородный или слоистый) породный массив, 2D-плоская деформация (рисунок 28, а). В этом случае протяженность массива в направлении, перпендикулярном плоскости разреза, полагается бесконечной, а деформация в этом направлении равна нулю. Предварительно рассматривалась тестовая задача – изучалось распространение волн от действия импульса силы внутри пространства

с целью подбора упругих механических параметров моделируемого горного массива (модуля упругости и коэффициента Пуассона) и получения скоростей продольной и поперечной волн сопоставимых с измеряемыми на практике.

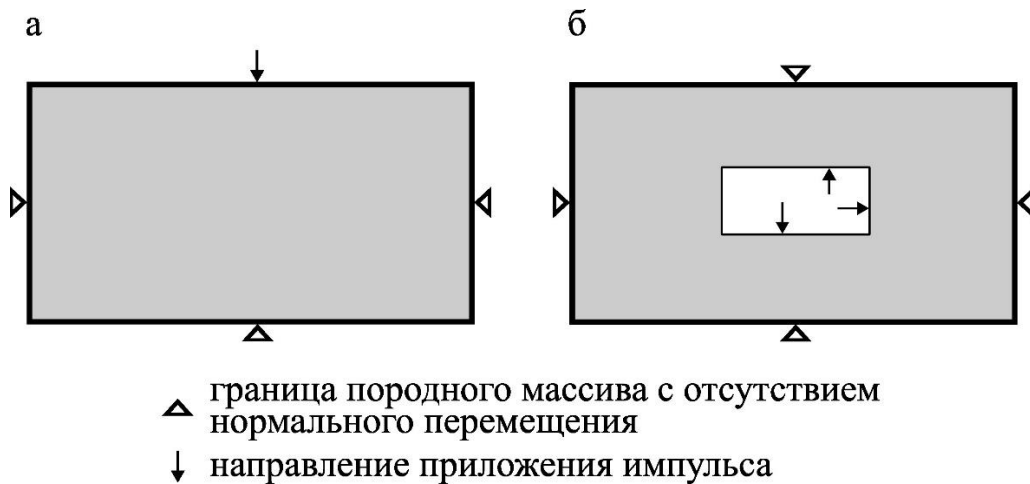


Рисунок 28 – Расчетная схема для варианта действия силы на границе полупространства (а) и при наличии горной выработки (б) (по данным автора [208])

Также изучался случай полупространства с выработкой, для которого рассмотрены варианты приложения вертикального усилия к кровле или почве, горизонтального усилия – к боковой стенке выработки (рисунок 28, б). Абсолютная величина усилия в данной задаче не является основополагающей, поскольку все остальные переменные задачи (скорости перемещения частиц, напряжения и деформации) являются пропорциональными заданной величине усилия. В остальных точках дневной поверхности или контура выработки (за исключением точки приложения силы) задаются условия отсутствия нормального и касательного напряжения – условия свободной поверхности.

Время действия усилия – 2 мс. Временная зависимость задана в виде треугольного импульса, при 1 мс достигается максимум, что определяет границы спектра излучаемого сигнала примерно от 10 до 2000 Гц. Такая характеристика импульса выбрана исходя из спектральных характеристик записей, получаемых в ходе натурных экспериментов.

На остальных контурах (границах) породного массива задавалось отсутствие нормального перемещения (рисунок 28). Размеры расчетной области

выбирались такими, чтобы за интересующее время 15–20 мс (в том числе, до 100 мс) отраженные от границ продольные и поперечные волны не приходили в интересующую область и не искажали анализируемое решение. Как правило, размеры расчетной области были приблизительно 160×160 м.

Кроме того, изучались варианты с наличием геологических слоев различной акустической жесткости, которые соответствовали слоям сильвинита и карналлита. Рассматривались слои на различном расстоянии от точки приложения силы, слои различной мощности, расположенные под углом к горизонту и волнообразные слои. Схема приложения нагрузки (три варианта приложения импульса) при наличии выработки изображена стрелками (рисунок 28, б).

Выполнен численный анализ распространения продольной и поперечной волны в полном пространстве при действии горизонтального треугольного импульса силы общей длительностью 2 мс (рисунок 29, рисунок 30).

Анализ закономерностей распространения упругой волны показывает, что амплитуда поперечных волн в несколько раз превышает амплитуду продольных, что отмечается и при расчетах теоретического волнового поля для тонкослоистой модели, описанных выше.

Определение упругих характеристик. Зная положение фронтов продольной и поперечной волны в различные моменты времени (рисунок 29, рисунок 30) можно оценить расчетные скорости распространения этих волн. Подбирая упругие характеристики (модуль упругости и коэффициент Пуассона) породного массива при математическом моделировании можно было бы добиться соответствия между скоростями распространения сейсмоакустических воздействий, измеряемыми на практике и их численными аналогами в расчетной схеме. Однако, в действительности, дело усложняется тем, что расчетная схема не соответствует в полной мере реально проводимому натурному эксперименту. А именно, решая плоскую задачу, мы задаем нагрузку не в точке, а на линии, в результате чего распространяется не чисто сферическая волна, а волна «цилиндрического» типа.

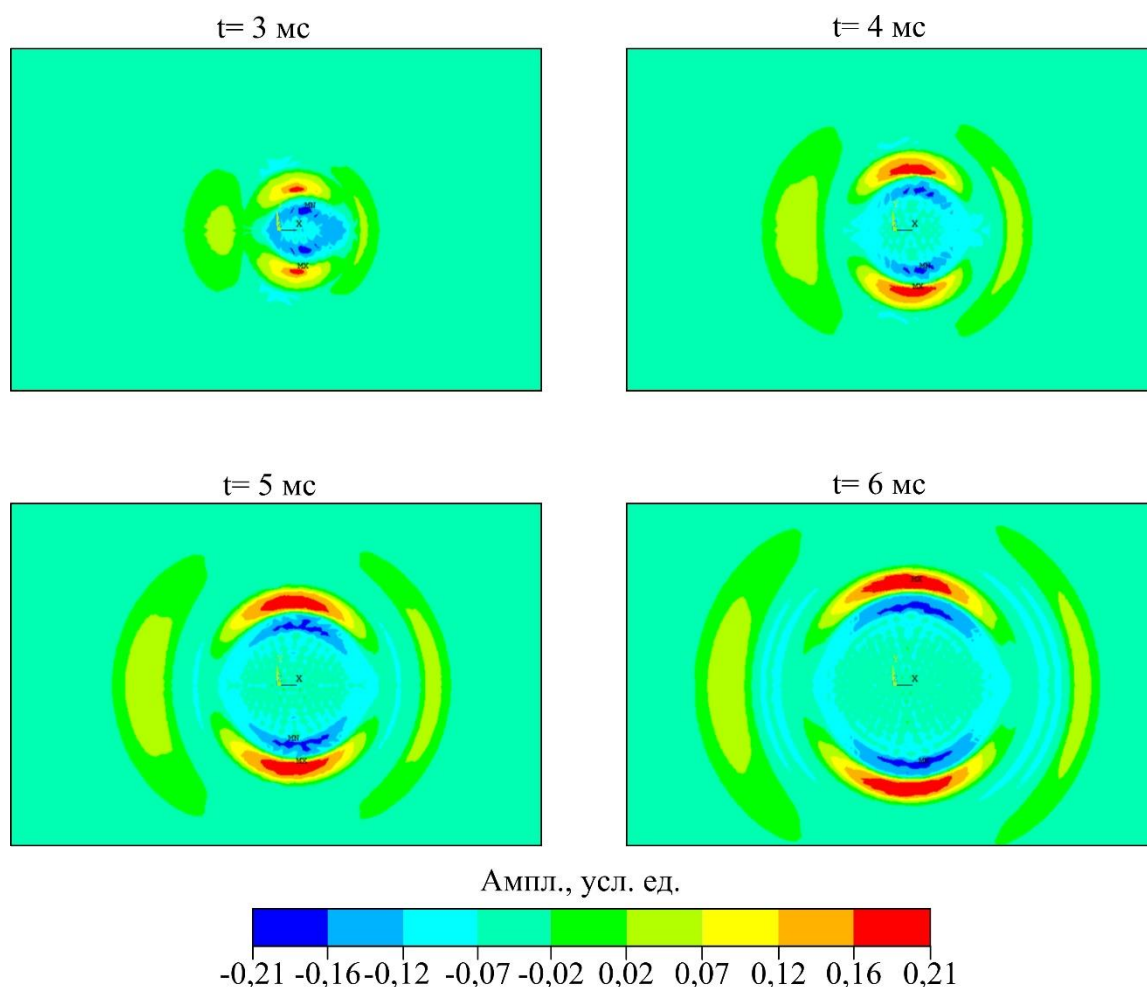


Рисунок 29 – Поля горизонтальной проекции скорости перемещения частиц V_x для различных моментов времени, горизонтальный импульс (по данным автора [208])

Сказанное выше, проиллюстрировано при решении задачи о распространении плоской волны в полупространстве, которая создается импульсной распределенной нагрузкой, действующей на участке большой длины. Например, по приведенным данным и результатам других вычислений для больших значений времени были получены следующие значения скоростей: скорость продольной волны $V_p = 2167 \text{ м/с}$, скорость поперечной волны $V_s = 1167 \text{ м/с}$. В данном тестовом расчете были приняты следующие значения механических характеристик: $E = 9800 \text{ МПа}$, $\mu = 0,25$ [137, 300].

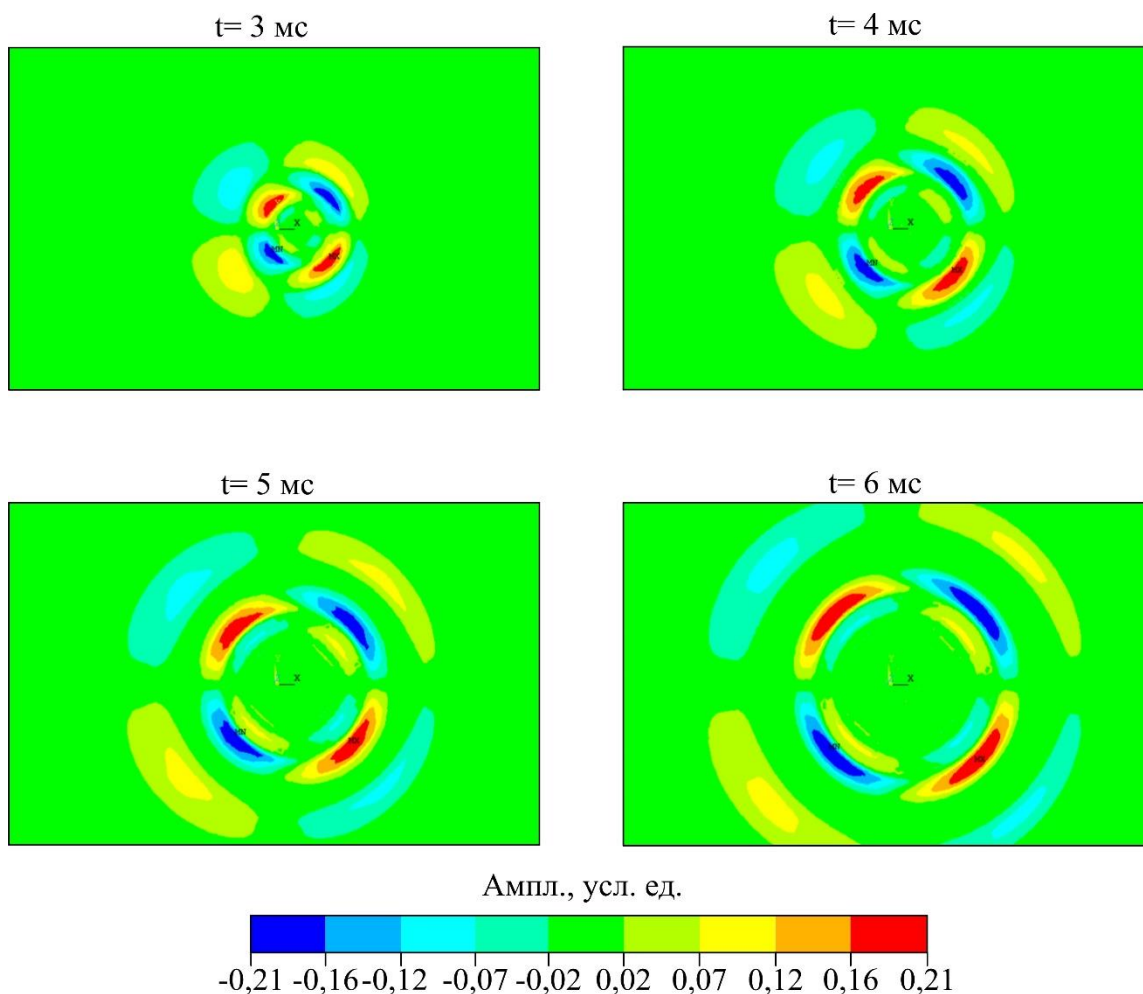


Рисунок 30 – Поля вертикальной проекции скорости перемещения частиц V_y для различных моментов времени, горизонтальный импульс (по данным автора [208])

Теоретические значения скоростей при таких характеристиках $V_p = 2425$ м/с, $V_s = 1400$ м/с. Натурные измерения показывают, что в среднем в солях скорость продольной волны $V_p = 4500$ м/с, скорость поперечной волны $V_s = 2500$ м/с. Поэтому в дальнейшем, упругие характеристики подбирались из условия соответствия натурных измерений и вычислений по той или иной расчетной схеме. В этом случае, возможно различие подбираемых упругих расчетных характеристик в зависимости от выбора расчетной схемы (2D-плоская, 2D-цилиндрическая, 2D-сферическая, 3D-пространственная модель).

Импульс силы на свободной поверхности полупространства. Рассмотрим плоскую расчетную область (плоская деформация), описывающую полупространство. Размер расчетной области 160 м по горизонтали и 80 м по вертикали. Сосредоточенная сила прикладывается к свободной поверхности

полупространства (в центре): этап нагрузки 1 мс, этап разгрузки – 1 мс (полная длительность треугольного импульса 2 мс). Рассмотрены два вида приложения силы: вертикальная и горизонтальная. В рамках каждой из задач рассмотрено два варианта: однородное полупространство из каменной соли и слоистое полупространство, представляющее собой слой каменной соли мощностью 10 м, ниже – карналлит. В качестве примера результатов расчета показано поле вертикальной скорости перемещения частиц для варианта вертикальной нагрузки на однородное полупространство при времени 10 мс (рисунок 31).

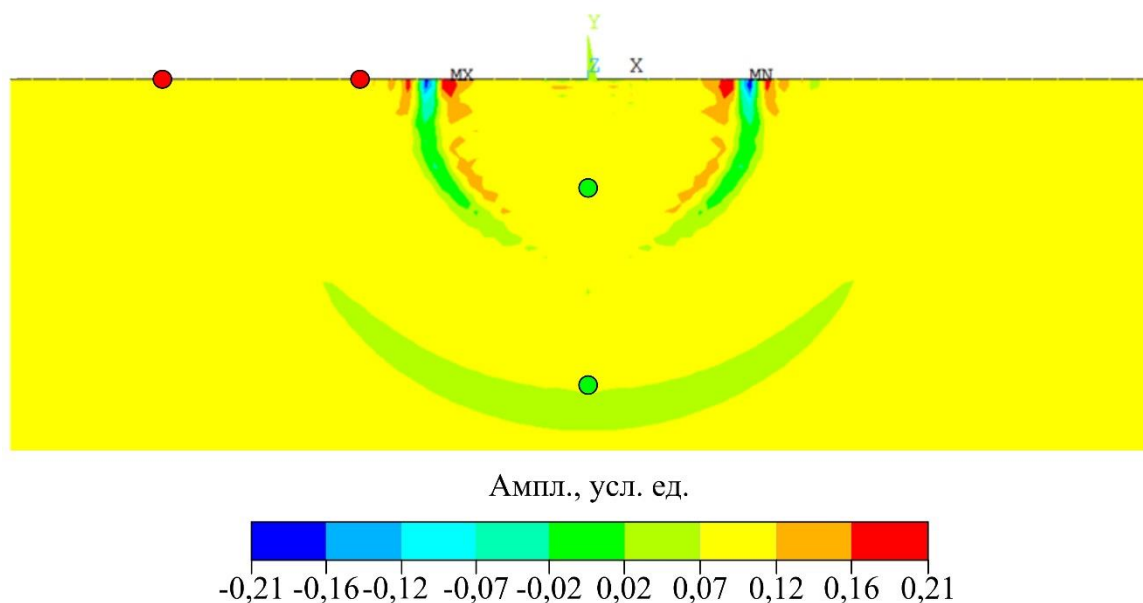


Рисунок 31 – Поле вертикальных скоростей перемещения частиц, вертикальный импульс (по данным автора [208])

Кружками показаны точки, для которых определены временные зависимости горизонтальной и вертикальной скорости. Красные точки моделируют датчики измерительной системы при проведении натурных экспериментов. С помощью них можно оценить скорость распространения поверхностных возмущений, а также сравнить эти данные с показаниями натурных измерений. Знание временных зависимостей скоростей в зеленых точках позволяет оценить скорость распространения возмущений внутри массива. Механические свойства пород, принятые в расчете: модуль упругости $E_{\text{кс}} = 30$ ГПа; $E_{\text{кар}} = 12$ ГПа; удельный вес $\gamma_{\text{кс}} = 2$ г/см³; $\gamma_{\text{кар}} = 1,8$ г/см³; коэффициент Пуассона $\mu_{\text{кс}} = 0,3$; $\mu_{\text{кар}} = 0,35$ [137], где индексом «кс» обозначены характеристики, присущие каменной соли, а

индексом «кар» – карналлиту. Приведенные значения не соответствуют усредненным значениям, полученным по данным лабораторных измерений, поскольку иначе скорость распространения упругих волн была бы далека от реальной.

В таблице 1 представлены данные измерений скоростей распространения возмущений вдоль свободной поверхности (измерения в красных точках, рисунок 31).

Таблица 1. Данные измерений скоростей вдоль свободной поверхности

Направление силы	Массив	V _x	V _y	V _x	V _y
		расстояние от силы = 13,9 м		расстояние от силы = 33,1 м	
вертикаль	однородный	2482	2574	2299	2399
вертикаль	слоистый	2482	2574	2299	2399
горизонталь	однородный	4964	2482	4476	2299
горизонталь	слоистый	4964	2482	4473	2299

В таблице 2 представлены данные измерений скоростей распространения возмущений вдоль вертикальной оси под точкой приложения силы (измерения в зеленых точках на рисунке 18).

Таблица 2. Данные измерений скоростей вдоль вертикальной оси

Направление силы	Массив	V _x	V _y	V _x	V _y
		расстояние от силы = 10,0 м		расстояние от силы = 38,6 м	
вертикаль	однородный	-	4545	-	4595
вертикаль	слоистый	-	4545	-	3509
горизонталь	однородный	2632	4545	2632	4545
горизонталь	слоистый	2464	-	2757	2717

Полученные в результате подбора механических свойств скорости упругих волн очень близки к скоростям, наблюдаемым в реальности в условиях соляных шахт, поэтому указанные выше свойства взяты за основу при расчетах в ANSYS.

Плоская волна и ее отражение от границы раздела пластов. Рассмотрим на примере распространения плоской волны ее отражение от границы двух пластов в полупространстве. В расчете участвует аналогичная область размером 160×80 м, лицевой слой мощностью 10 м состоит из каменной соли, ниже – карналлит. Все механические свойства, граничные условия, сетка взяты из предыдущей задачи. Вместо сосредоточенной силы на свободной границе на участке длиной 2×40 м = 80 м действует распределенный треугольный импульс сжатия, полное время 2 мс. Ниже показаны поля вертикальной скорости для времени 5 мс для слоистого массива (рисунок 32, а), и для однородного массива (рисунок 32, б).

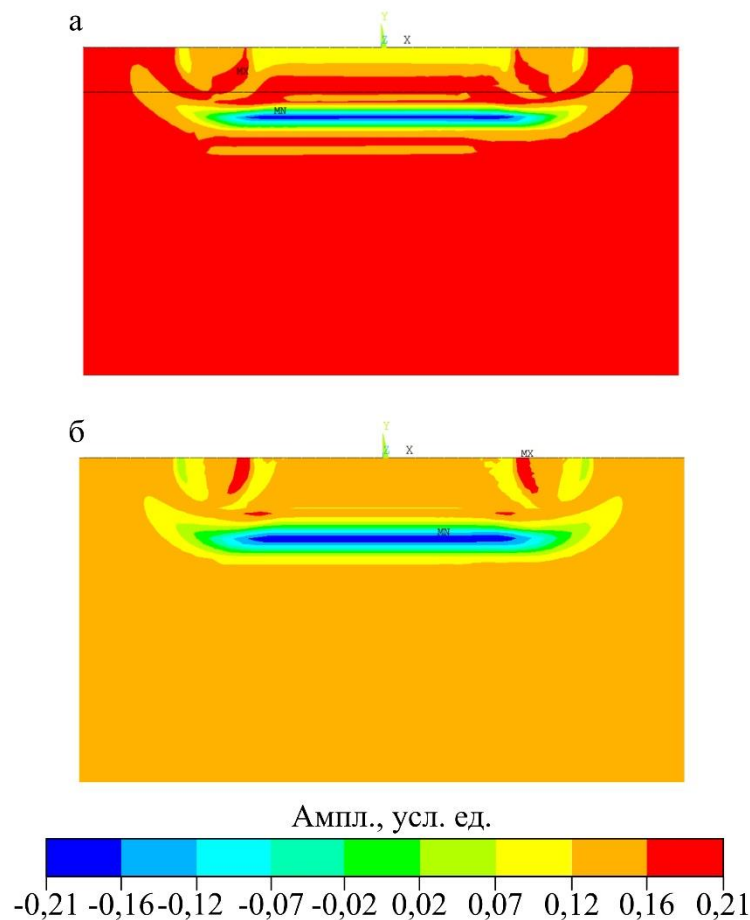


Рисунок 32 – Поле вертикальной скорости перемещения частиц среды для слоистого массива (а), и для однородного массива (б) (по данным автора [208])

Стрелкой на рисунке 19, а отмечена отраженная от границы раздела сред плоская продольная волна. Сравнение рисунков 19, а и 19, б показывает явное наличие отраженной плоской продольной волны от границы раздела пластов (рисунок 29, а), что указывает на эффективность принятого подхода с подбором

механических свойств.

Волновые поля для разных моделей среды. Всего в ходе исследований были выполнены расчеты для следующих моделей инженерно-геологического массива:

- полное однородное пространство без выработки,
- полное однородное пространство с выработкой,
- полное пространство с выработкой и одним плоским слоем карналлита мощностью 1 м,
- полное пространство с выработкой и двумя плоскими слоями карналлита мощностью по 1 м, разделенными слоем каменной соли мощностью 1 м,
- полное пространство с выработкой и одним волнистым слоем карналлита мощностью 1 м,
- полное пространство с выработкой и двумя волнистыми слоями карналлита мощностью по 1 м, разделенными слоем каменной соли мощностью 1 м,
- полное пространство с выработкой и одним наклонным слоем карналлита мощностью 1 м.

Все модели исследованы с возбуждением упругих волн приложением точечной нагрузки как в вертикальном направлении (в кровлю выработки), так и в горизонтальном (в стену выработки). Анализ результатов, полученных для разных моделей, указывает на одни и те же основные моменты. Поэтому опишем результаты детального анализа материалов, полученных в ходе моделирования, на примере модели с двумя слоями карналлита, расположенными на расстоянии 20 м от выработки (рисунок 33).

При воздействии на массив вертикальной нагрузкой в кровлю выработки возникает два четко различимых фронта волн – продольной и поперечной (рисунок 33, а). Продольная волна распространяется в данном случае преимущественно в вертикальном направлении, а поперечная – преимущественно в горизонтальном. При воздействии на массив горизонтальной нагрузки возникает продольная волна, распространяющаяся преимущественно в горизонтальном направлении, и поперечная, распространяющаяся преимущественно в вертикальном направлении (рисунок 33, б).

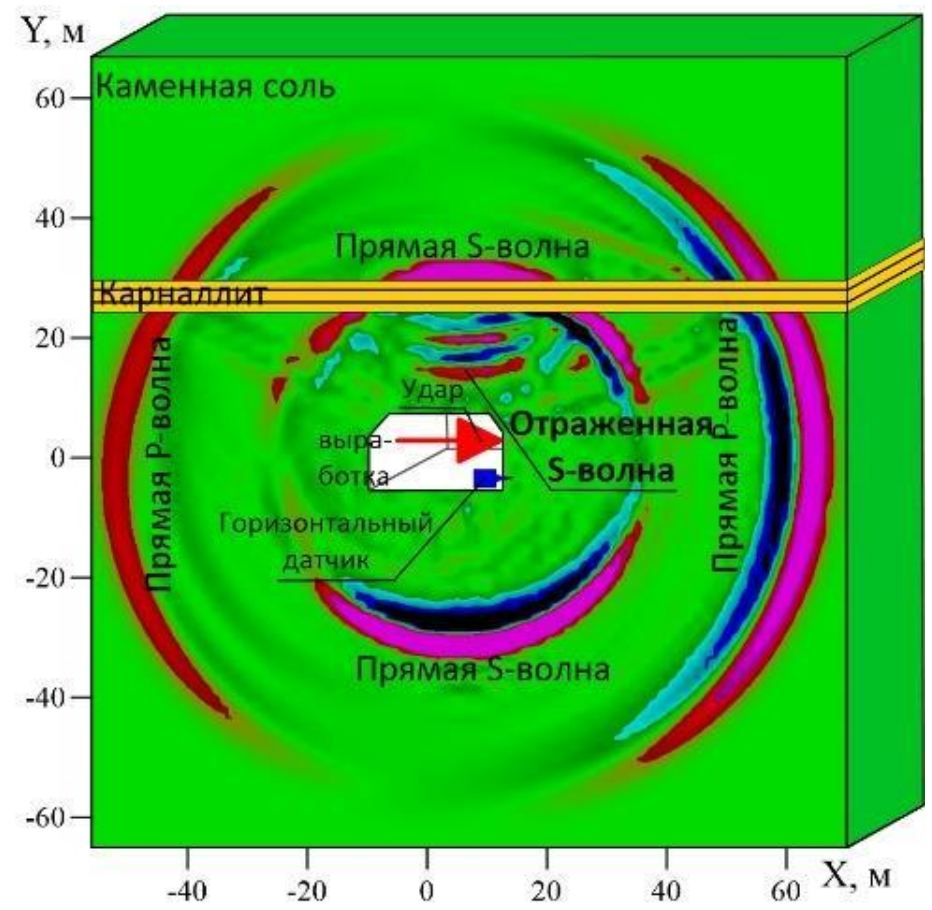
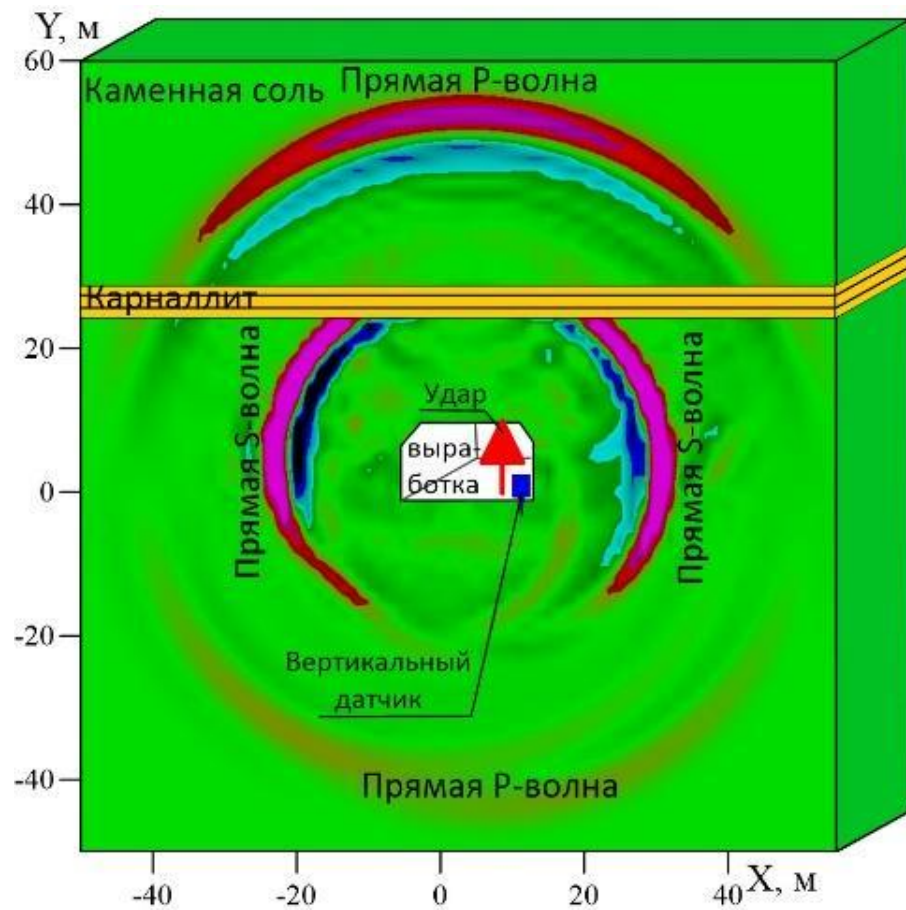


Рисунок 33 – Результаты моделирования распространения упругих волн в программе Ansys для модели с прослойками карналлита для случаев: а – вертикально-направленного источника, б – горизонтально-направленного источника (по данным автора [208])

Анализ полученных картин дает ответ на вопрос о направленности источника типа «сосредоточенная сила» в условиях соляных шахт, стоящий перед исследованиями на рассматриваемом типе моделей. Направленность продольных волн соответствует оси приложения нагрузки источником типа «сосредоточенная сила», то есть большая часть их энергии распространяется вдоль оси удара. Поперечные же волны направлены практически ортогонально оси приложения нагрузки, то есть распространяются в основном радиально относительно оси удара.

Кроме того, отмечены следующие неожиданные особенности волнового поля – падающая цилиндрическая продольная волна не формирует хоть сколько-либо заметной продольной отраженной волны от слоев карналлита, расположенных выше выработки, хотя, судя по форме фронта, эффекты преломления присутствуют (рисунок 33, а). Не исключено, что продольная отраженная волна все-таки формируется, но ее амплитуда настолько мала, что различить ее на фоне колебаний, происходящих рядом с выработкой, невозможно. Объясняется данный эффект особенностями формирования отражения продольной (цилиндрической или сферической) волны на контакте каменной соли и карналлита. Данное явление, при подтверждении на натурных экспериментах, ставит под вопрос возможность выполнения шахтных сейсморазведочных исследований галогенной формации месторождений солей на продольных волнах в изучаемом частотном диапазоне 10–2000 Гц на расстояниях от системы регистрации в первые десятки метров.

В то же время отмечается четко выраженная поперечная отраженная волна, которая после отражения от слоев карналлита возвращается к выработке, где зарегистрировать ее не составляет труда (рисунок 33, б). Данный факт подтверждает вывод о том, что в рассматриваемой геологической ситуации поперечные волны позволяют получать четкие изображения особенностей геологической среды.

Так же наблюдается эффект экранирования волн, который проявляется в том, что амплитуда продольной волны, распространяющейся в направлении удара, в несколько раз больше амплитуды волн, распространяющейся в противоположном направлении (рисунок 33). С одной стороны, данное явление можно использовать

для формирования продольной волны, максимально ориентированной в одном направлении, а с другой стороны, указывает на необходимость установки сейсмоприемников с учетом направления, откуда ожидается приход целевых отраженных волн.

И, наконец, третий момент, который обратил на себя внимание при математическом моделировании. На представленных результатах хорошо видно, что поперечная волна распространяется с одинаковой интенсивностью в обе стороны от источника упругих волн (рисунок 33). При наличии отражающих границ по обеим сторонам от выработки, это неизбежно приведет к интерференции отраженных волн, приходящих из разных полупространств, таким образом, возникает необходимость в их разделении. На момент выполнения описываемых исследований рабочей методики по разделению отражений, приходящих из разных полупространств, не существовало, поэтому потребовалась её разработка.

Выводы по результатам математического моделирования. По результатам исследований особенностей распространения упругих волн методами математического моделирования можно сделать следующие основные выводы.

1. Математическое моделирование для подземных условий адекватно отражает волновые процессы в инженерно-геологическом массиве, что весьма полезно при изучении закономерностей распространения упругих волн, расшифровке и интерпретации результатов натурных измерений шахтной сейсморазведки, и при разработке новых методик шахтной сейсморазведки.

2. Шахтные исследования в частотном диапазоне 10–2000 Гц *на продольных волнах не перспективны*, при этом *использование поперечных волн дает возможность детального изучения геологической среды*.

3. Упругие волны в заметной степени экранируются выработкой, что позволяет получить падающую упругую волну, распространяющуюся преимущественно в одном из направлений, и экранировать отраженную волну, приходящую с ненужного направления.

4. При ударном воздействии на стены выработки, возникает поперечная волна, распространяющаяся в радиальном направлении по отношению к направлению силы, что определяет специфические требования к комплексу

«источник – система наблюдения», а также необходимость разработки способа разделения отражений, приходящих к приемной линии из разных полупространств.

Полученные в ходе теоретических исследований результаты и выводы подтверждаются при проведении натурных экспериментов во внутренних точках среды. На территории ВКМС выполнен значительный объем таких исследований, результаты их приведены в следующем разделе.

2.2.3 Физическое моделирование в реальных условиях

В данной работе используются следующие термины:

- «*ориентация (ударов) источника*» – направление, вдоль которого выполняются удары;
- «*направленность источника (Р- или S-волн)*» – направление (относительно ориентации источника), в котором волна имеет наибольшую амплитуду, нельзя путать с *ориентацией* источника, поскольку направленность может не совпадать с направлением удара, особенно это касается S-волн;
- «*направленность сейсмоприемника*» - направление, вдоль которого сейсмоприемник имеет наибольшую чувствительность.

Также необходимо заострить внимание на том, что в шахтных условиях следует использовать термины не «поперечные» и «продольные» сейсмоприемники, как зачастую это происходит на практике, а «вертикально-ориентированные» и «горизонтально-ориентированные», или просто «вертикальные» и «горизонтальные». Это вызвано тем, что работы в шахте ведутся в условиях полного пространства, поэтому любой из типов сейсмоприемников будет регистрировать и продольные и поперечные волны, приходящие к нему с разных сторон.

Переобработка архивных шахтных сейсмических материалов. Математическое моделирование показало перспективность выполнения сейсморазведочных работ в шахтных условиях в солях на поперечных волнах. Исходя из этой информации проведена переобработка архивных сейсморазведочных материалов, ориентированных на регистрацию продольных волн, со скоростями поперечных волн [92, 208, 224]. Указанные материалы

получены с вертикально-ориентированными сейсмоприемниками, установленными в подошву выработки около одной из стен, возбуждение колебаний выполнялось вертикальными ударами в кровлю выработки возле той же стены, около которой установлены сейсмоприемники.

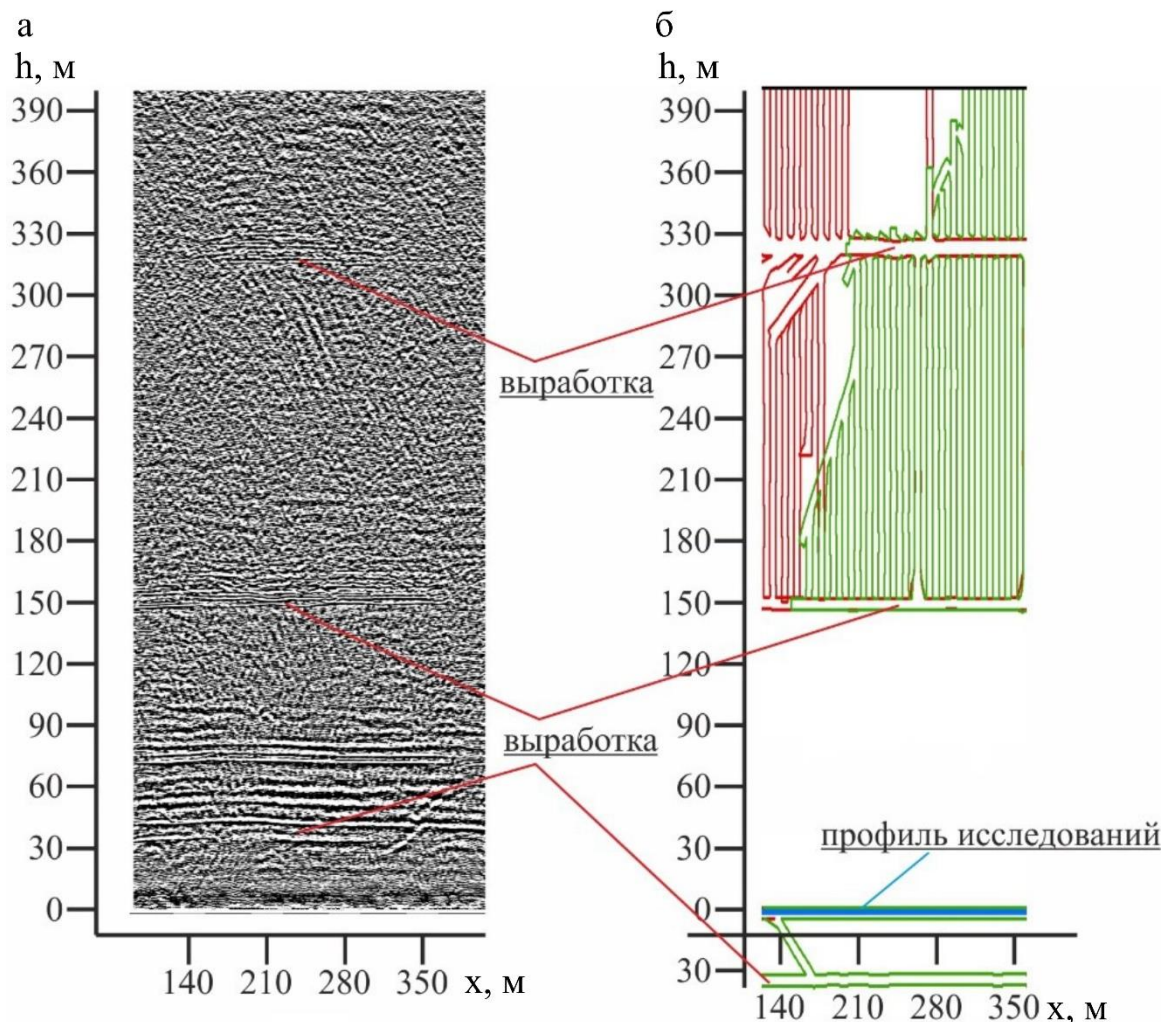


Рисунок 34 Результат переобработки сейсморазведочных материалов, горизонтальная плоскость: а – глубинный разрез, обработанный со скоростями поперечных волн; б – план шахтных выработок (по данным автора [224])

Переобработка подтвердила выводы о том, что при возбуждении сигнала вертикальными ударами, вертикально-ориентированные датчики регистрируют не столько отраженные Р волны, распространяющиеся в направлении удара, сколько поперечные, распространяющиеся в горизонтальном направлении. Основная причина данного явления – амплитуда S-волн в разы выше амплитуды Р-волн. Ниже представлен разрез, просуммированный со скоростями поперечных волн,

совмещенный с планом шахтных выработок по участку исследований (рисунок 34).

На разрезе хорошо видны отражения от выработок на расстояниях 30, 150 и 320 м, параллельных той, в которой выполнялось возбуждение и регистрация сейсмической записи (рисунок 34, а). Указанные выработки находятся в одной горизонтальной плоскости с рабочей выработкой. Помимо этого, в интервале 30–90 м присутствует еще несколько отражений, связанных с многократным отражением волны от параллельных выработок вблизи линии наблюдения.

Таким образом, данный разрез содержит информацию в горизонтальной плоскости, несмотря на то, что удары выполнялись в вертикальном направлении. Полученный результат является предпосылкой для дальнейших натурных исследований особенностей распространения поперечных волн при проведении шахтных сейсморазведочных работ МОВ МОГТ.

Экспериментальные натурные исследования по сейсмическому просвечиванию между выработками в вертикальном направлении. Наиболее важным выводом, полученным по результатам математического моделирования, является заключение о том, что в условиях полного пространства направленность источника упругих колебаний типа «сосредоточенная сила» в отношении поперечных волн близка к 90^0 по отношению к направлению воздействия. Практическое подтверждение этого вывода получено в ходе специально выполненного эксперимента по просвечиванию в вертикальном направлении [224]. Для этого использована скважина, соединяющая пласты КрIII, КрII, и АБ.

Первая часть эксперимента заключалась в возбуждении колебаний в самой нижней выработке в пласте КрIII, и регистрации колебаний в верхней выработке в пласте АБ (рисунок 35, в). Возбуждение колебаний выполнялось горизонтальными ударами в стену выработки, тем самым повторялась схема эксперимента по математическому моделированию с горизонтальным приложением нагрузки и регистрацией поперечных волн, распространяющихся в вертикальной плоскости, горизонтальными сейсмоприемниками.

Регистрация выполнялась приемной расстановкой, состоящей из девяти до шести горизонтально-ориентированных сейсмоприемников типа GS-ONE,

установленных на прямой ножке в стену выработки в том же направлении, в котором выполнялись удары. Регистрация выполнялась с шагом дискретизации 0,25 мс, число накоплений – 5, длина записи 256 мс, в открытом канале, расстояние между пунктами приема – 2 м, синхронизация выполнялась с помощью проводной линии, проложенной от станции к источнику упругих колебаний через подземную скважину.

Зарегистрированная полевая сейсмограмма демонстрирует четко выраженную прямую S-волну и гораздо менее различимую Р-волну (рисунок 35, а). Амплитуда прямых продольной и поперечной волн различается в 10 раз. После полосовой фильтрации и амплитудной регулировки становятся хорошо различимы и отраженные S-волны, отраженных Р-волн не наблюдается (рисунок 35, б).

Вторая часть эксперимента по просвечиванию в вертикальной плоскости заключалась в регистрации упругих волн внутри скважины с помощью скважинного зонда, предназначенного для вертикального сейсмического профилирования (ВСП), для этого использована соответствующая схема наблюдений (рисунок 35, д). Регистрация выполнялась трехкомпонентным зондом с шагом дискретизации по времени 0,25 мс, шаг по вертикали – 0,5 м. В результате получена сейсмограмма ВСП (рисунок 35, г), на которой также четко фиксируются прямые S- и Р-волны, с разницей в амплитуде в 10 раз. Как и на полевой сейсмограмме, выделяются отраженные S-волны, и не выделяются отраженные Р-волны. Искривление годографа прямых волн вызвано огибанием ими выработки в соответствии с явлением дифракции.

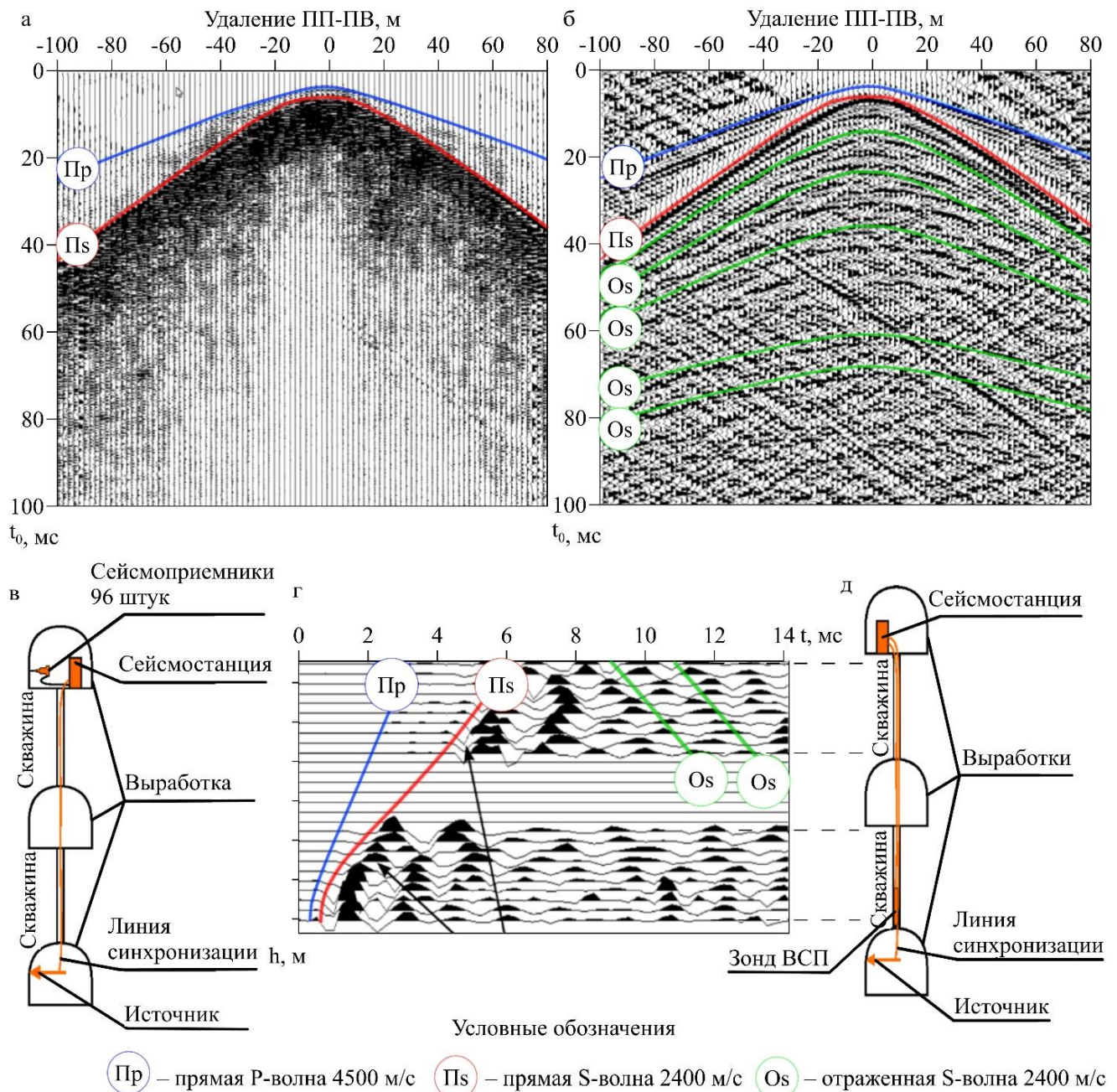


Рисунок 35 – Исследование закономерностей распространения упругих волн в вертикальной плоскости: а – полевая сейсмограмма; б – то же, после обработки; в – схема наблюдений с полевой расстановкой; г – сейсмограмма ВСП; д – схема наблюдений ВСП (по данным автора [224])

По итогам данного эксперимента, сформирована схема распространения фронта упругой поперечной волны при возбуждении упругих колебаний горизонтальными ударами в стену выработки (рисунок 36).

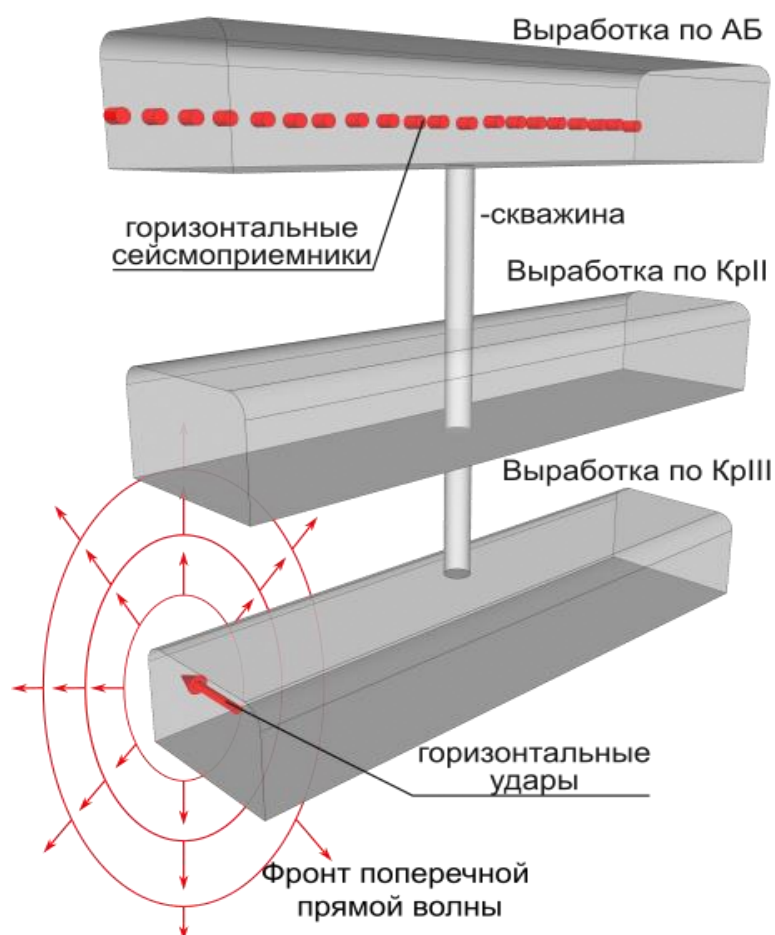


Рисунок 36 – Распространение фронта упругой поперечной волны в описываемом эксперименте (по данным автора)

Таким образом, обе части натурального эксперимента по сейсмическому просвечиванию между выработками в вертикальном направлении приводят к одинаковым выводам, которые можно сформулировать следующим образом.

1. В солях в условиях полного пространства S-волны распространяются преимущественно в направлении, перпендикулярном направлению воздействия ударного источника.
2. На записях фиксируются прямые S-волны и Р-волны, амплитуда Р-волн в 10 раз меньше амплитуды S-волн.
3. Как на профильной сейсмограмме, так и на сейсмограмме ВСП фиксируются отраженные S-волны.
4. Как на полевой сейсмограмме, так и на сейсмограмме ВСП выделить

отраженные Р-волны невозможно.

Приведенные выводы согласуются с результатами математического моделирования в программах Tessleral и Ansys.

Экспериментальные натурные профильные сейсмические исследования. Эксперимент по просвечиванию в вертикальном направлении с использованием скважины, рассмотренный выше, не позволяет оценить все особенности возбуждения и регистрации упругих колебаний в условиях полного пространства в солях. Для их освещения выполнены масштабные экспериментальные работы со всеми возможными сочетаниями расположения и ориентации сейсмоприемников и источника в условиях подземных горных выработок [92, 224].

Описываемые работы выполнены в геологических условиях, типичных для большинства действующих рудников на территории ВКМС (рисунок 37). Для проведения исследований выбран северный ход главного восточного вентиляционного штрека, пройденный в широтном направлении по пласту АБ. (рисунок 38). В непосредственной близости от рабочей выработки находится целый ряд других штреков, как в пласте АБ, так и ниже, в пластах КрII и КС (рисунок 38, рисунок 39).

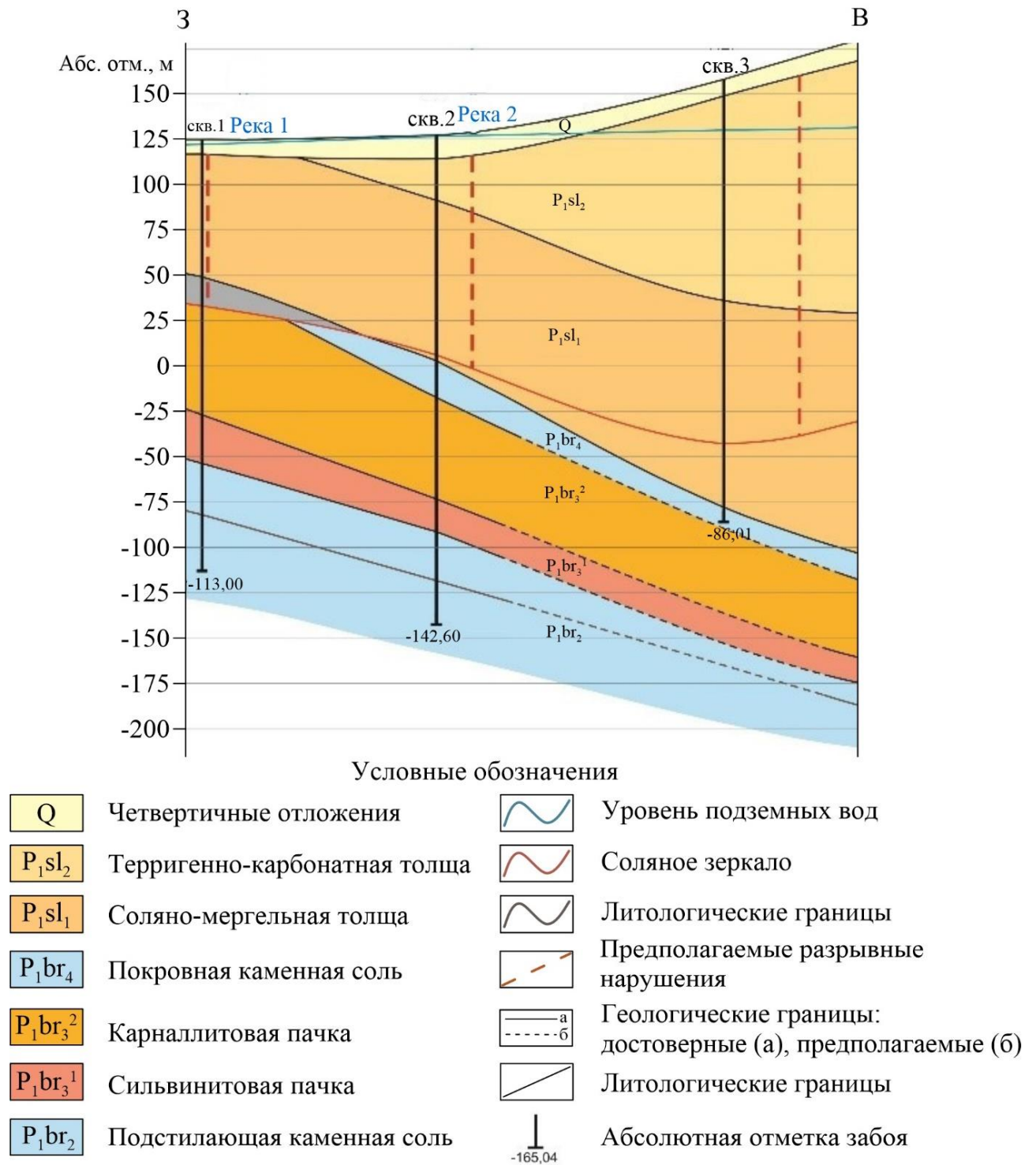


Рисунок 37 – Геологический разрез по линии скважин (по данным [150])

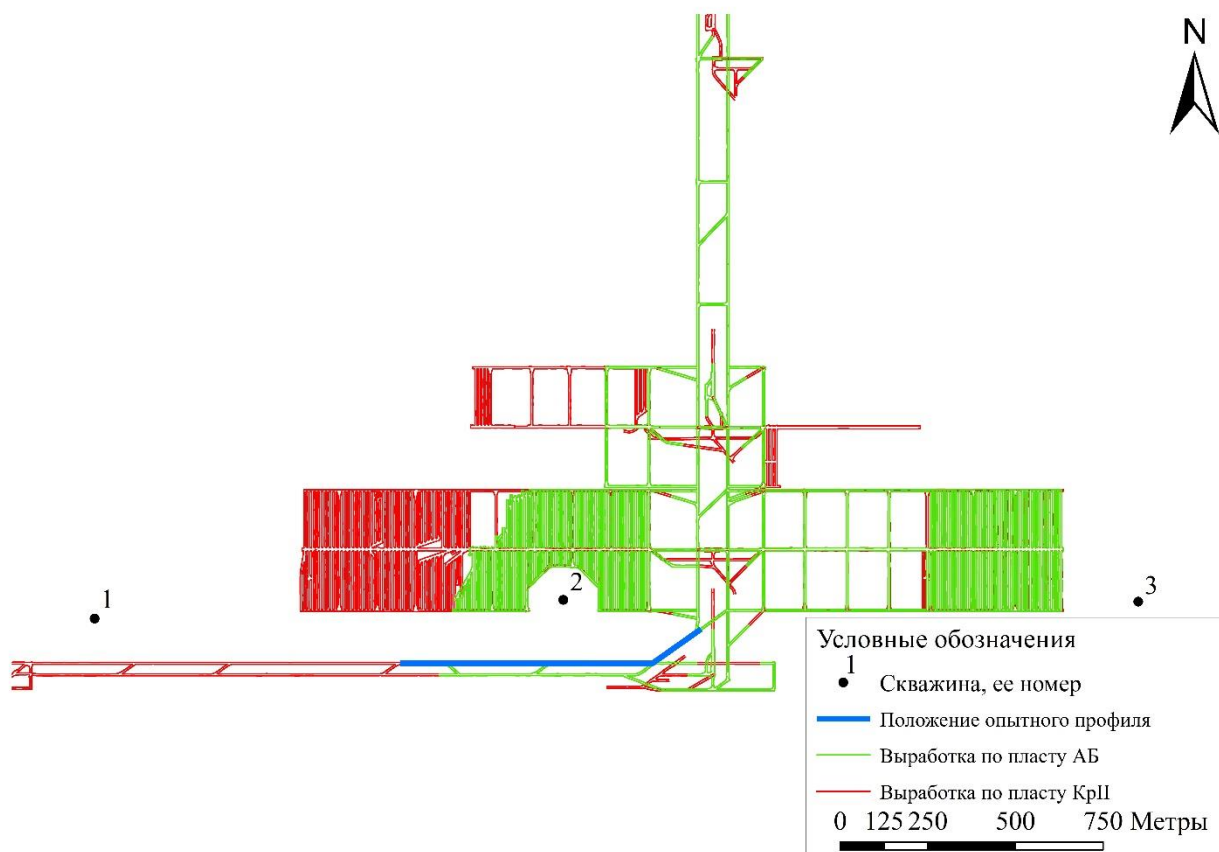


Рисунок 38 – Ситуационный план участка исследований на момент проведения работ (по данным автора [92, 224])

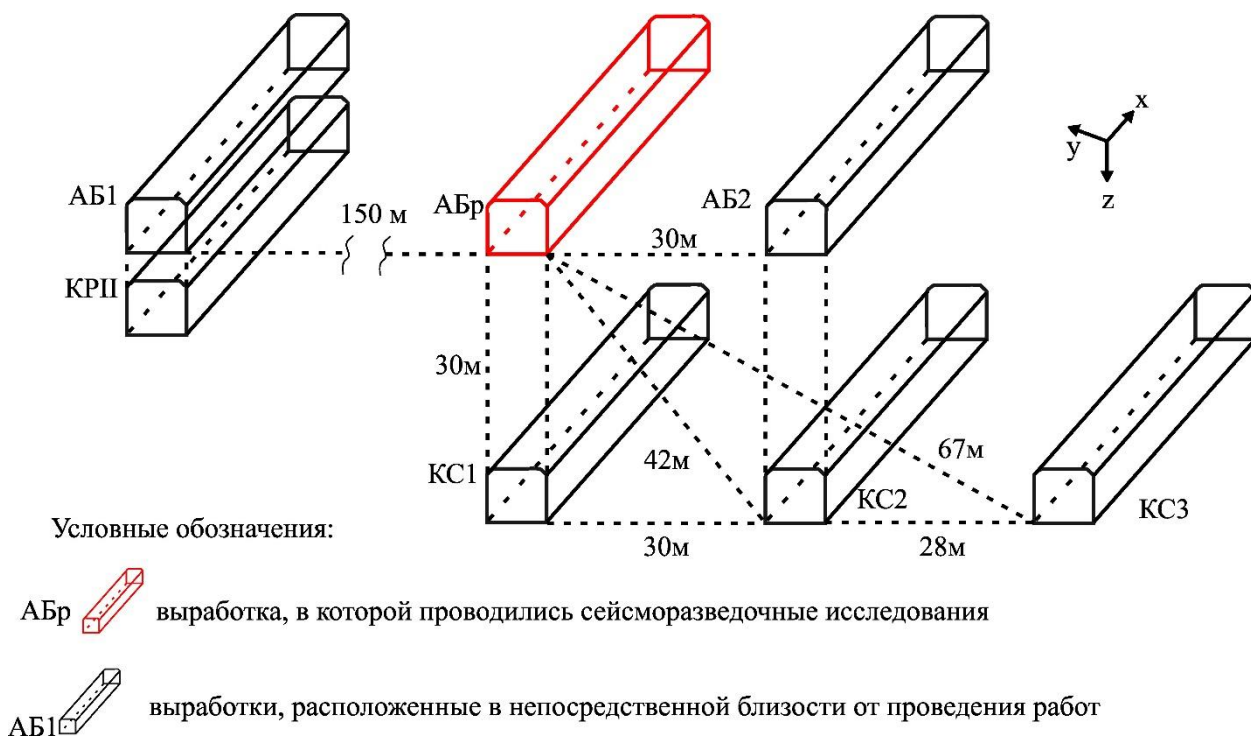


Рисунок 39 – Схема расположения рабочей и близлежащих выработок (по данным автора [92, 224])

Поскольку по результатам математического моделирования и просвечивания получены сведения, что в условиях шахт S-волны должны распространяться в направлении, близком к перпендикуляру по отношению к оси удара, и в целом вокруг выработки происходят сложные волновые процессы [237], необходим перебор всех возможных вариантов сочетания типов и способов установки сейсмоприемников и направления возбуждения упругих колебаний.

Исследования разделены по типам сейсмоприемников – с горизонтальными и вертикальными датчиками (рисунок 40). Сейсмоприемники сориентированы вертикально и горизонтально, но только перпендикулярно оси выработки, поскольку возбуждение колебаний вдоль оси выработки крайне затруднено, и, при этом, такой вариант ориентации не имеет каких-либо дополнительных преимуществ.

Далее, каждый из двух вариантов разветвляется еще на 4 – установка приемной линии с каждым из двух видов сейсмоприемников последовательно в почву, северную стену, южную стену и кровлю выработки. Кроме этого, в случае использования вертикально-ориентированных сейсмоприемников рассматривались два варианта их крепления к стене выработки. Как видно из схемы исследований (рисунок 40), большая часть работ требует использования сейсмоприемников на нестандартных креплениях.

Конструкции для крепления сейсмоприемников. Для установки сейсмоприемников в ряд позиций согласно приведенной схемы необходимы нестандартные крепления сейсмоприемников [237]. Это вызвано тем, что серийно-выпускаемые сейсмоприемники предназначены для поверхностных работ, где и горизонтальные и вертикальные датчики устанавливаются всегда только на горизонтальную поверхность (почву), при этом простая и быстрая смена креплений не предусматривается.

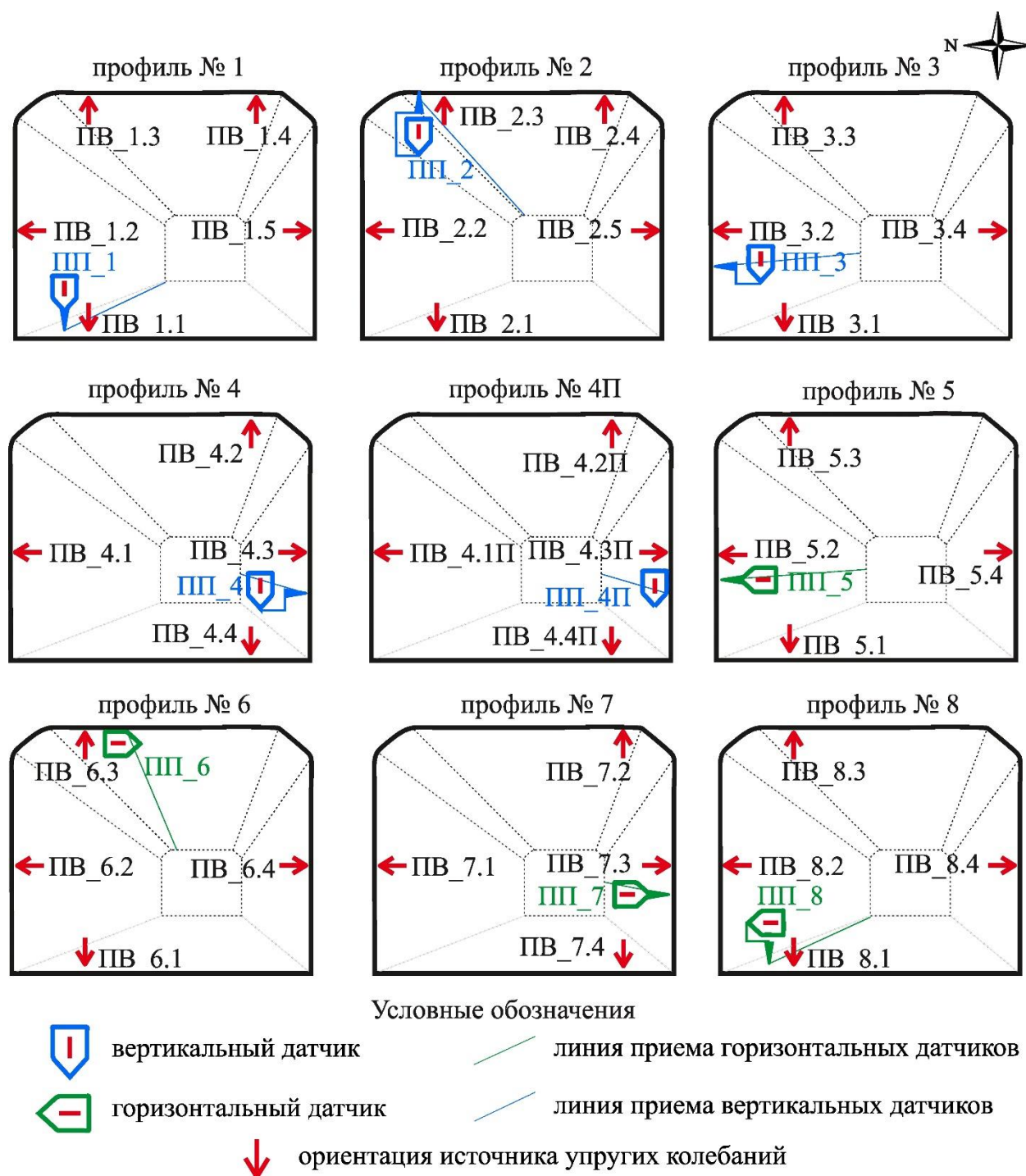


Рисунок 40 Схема сочетаний расположения и конструкции сейсмоприемников и направлений ударов (по данным автора [92, 224])

В шахтных же условиях, в отличие от поверхностных, каждый из видов сейсмоприемников требуется установить и на вертикальную, и на горизонтальную поверхности, в том числе на кровлю выработки в зависимости от горной обстановки на участке и задач исследований. Исходя из указанных требований, для

выполнения экспериментальных работ разработаны, либо переставлены с датчиков других типов, следующие виды креплений.

1. Штыревое крепление для установки горизонтальных сейсмоприемников в стены выработки (рисунок 41, а).

2. Угловое крепление для установки вертикальных сейсмоприемников в стены выработки (рисунок 41, б).

3. О-образное крепление для установки вертикальных сейсмоприемников в кровлю выработки. Предусмотрено резьбовое соединение для надежного крепление сейсмоприемников к кровле, с учетом веса соединительных кабелей и телеметрических модулей (рисунок 42, а).

4. Угловое крепление для установки горизонтальных сейсмоприемников в кровлю выработки. Предусмотрено резьбовое соединение для надежного крепление сейсмоприемников к кровле, с учетом веса соединительных кабелей и телеметрических модулей (рисунок 42, б).

5. В качестве альтернативы угловым и другим креплениям сложной конфигурации предусмотрены прижимные крепления, позволяющие прижимать корпус сейсмоприемников непосредственно к кровле выработки (рисунок 43), аналогичными креплениями крепятся вертикальные сейсмоприемники к стене выработки.

6. В подошву выработки сейсмоприемники устанавливаются на свои стандартные крепления – горизонтальные на угловые, а вертикальные на штыревые (рисунок 44).

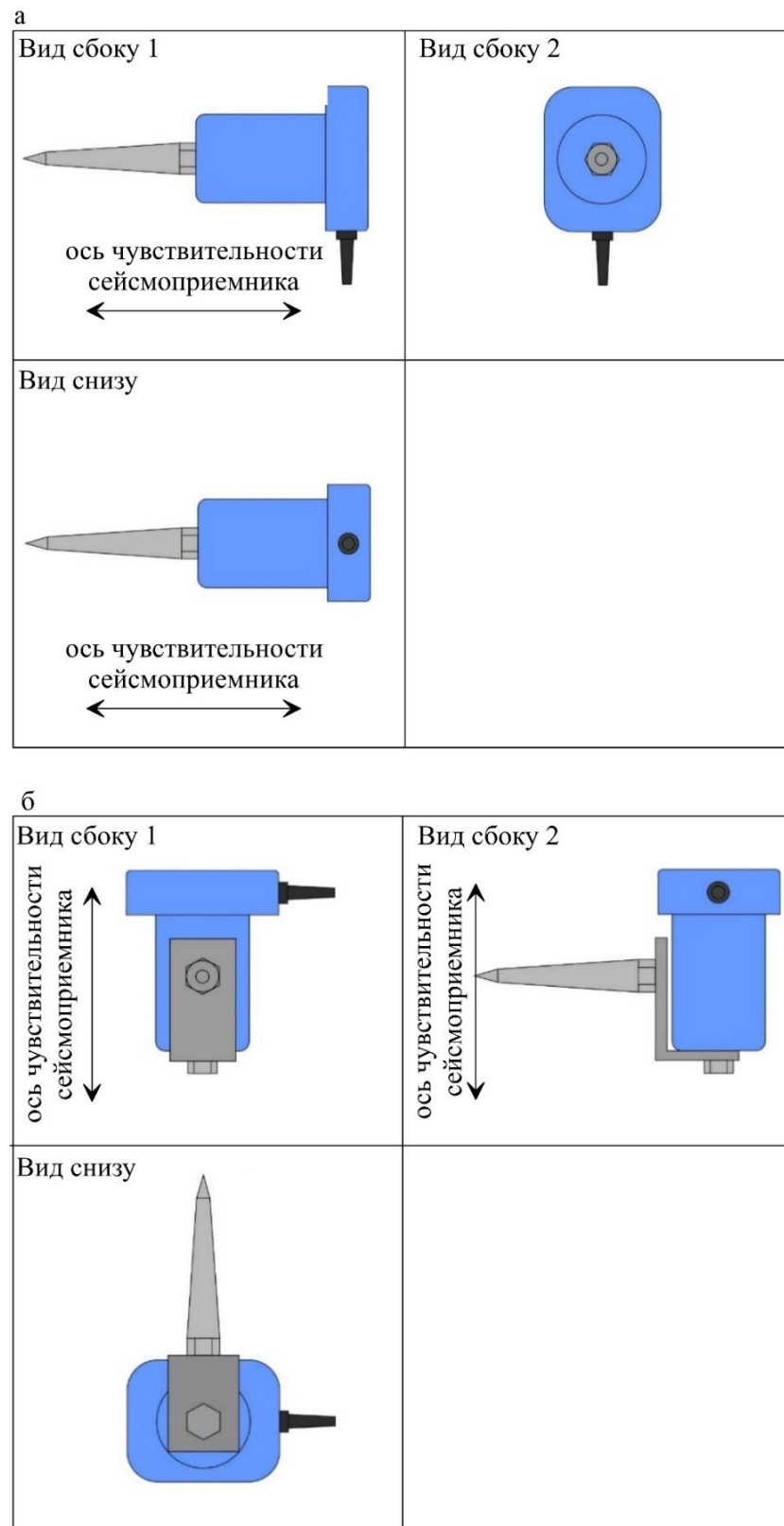


Рисунок 41 – Конструкция крепления сейсмоприемников в стены выработки: а – горизонтальных; б – вертикальных (по данным автора [92, 224])

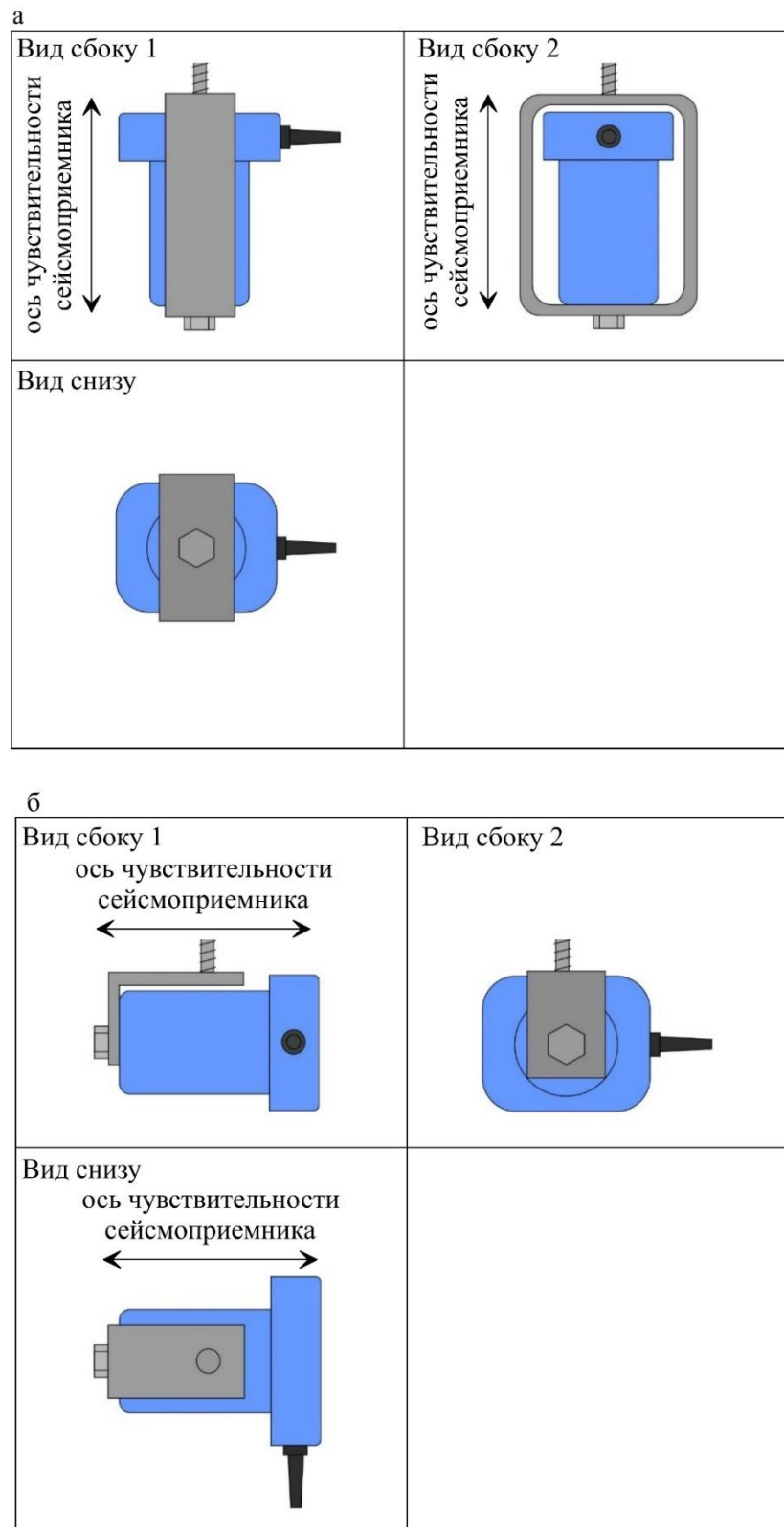


Рисунок 42 –Конструкция крепления сейсмоприемников в кровлю выработки: а – вертикальных; б – горизонтальных (по данным автора [92, 224])

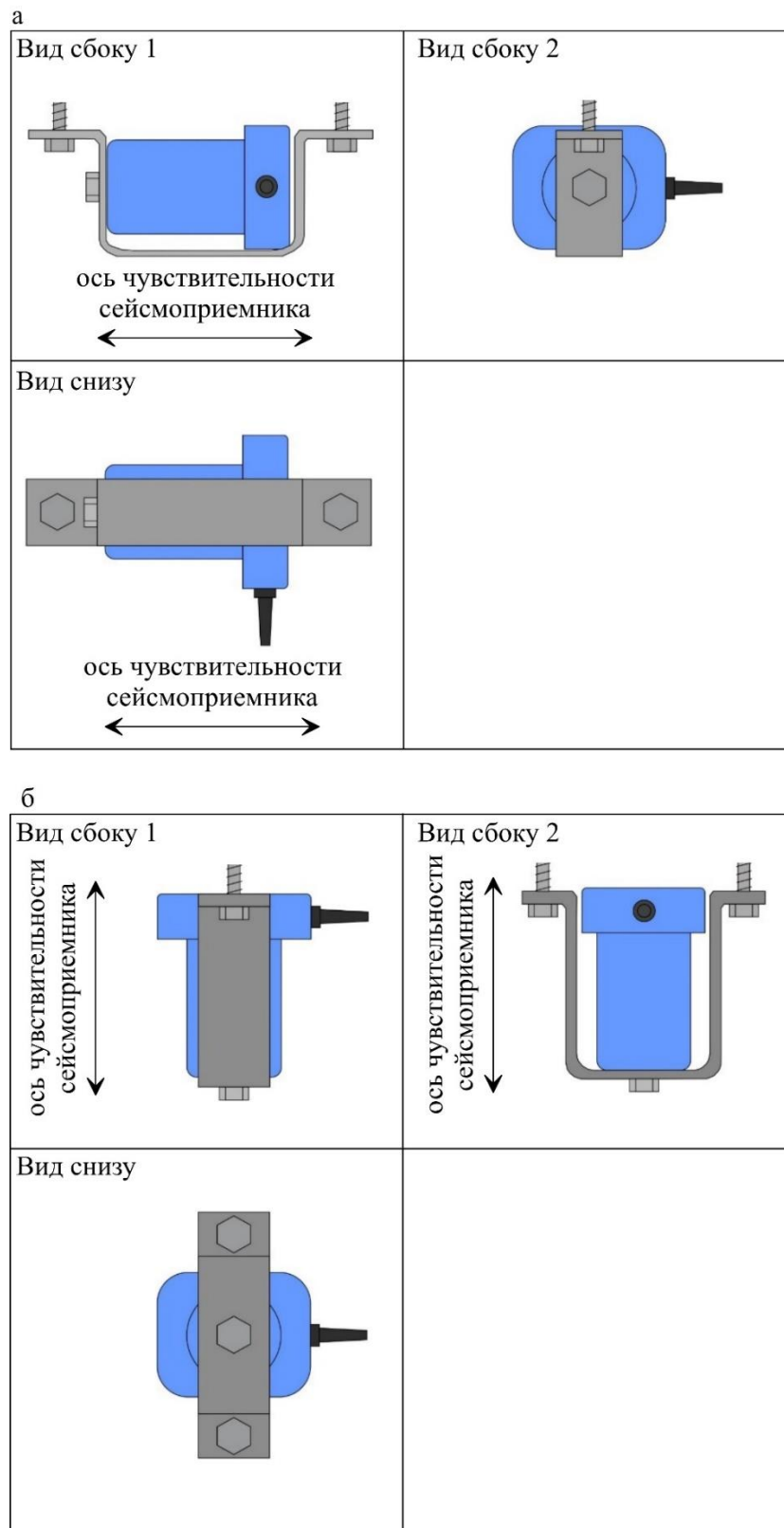


Рисунок 43 – Конструкция прижимного крепления сейсмоприемников в кровлю выработки: а – горизонтальных; б – вертикальных (по данным автора [92, 224])

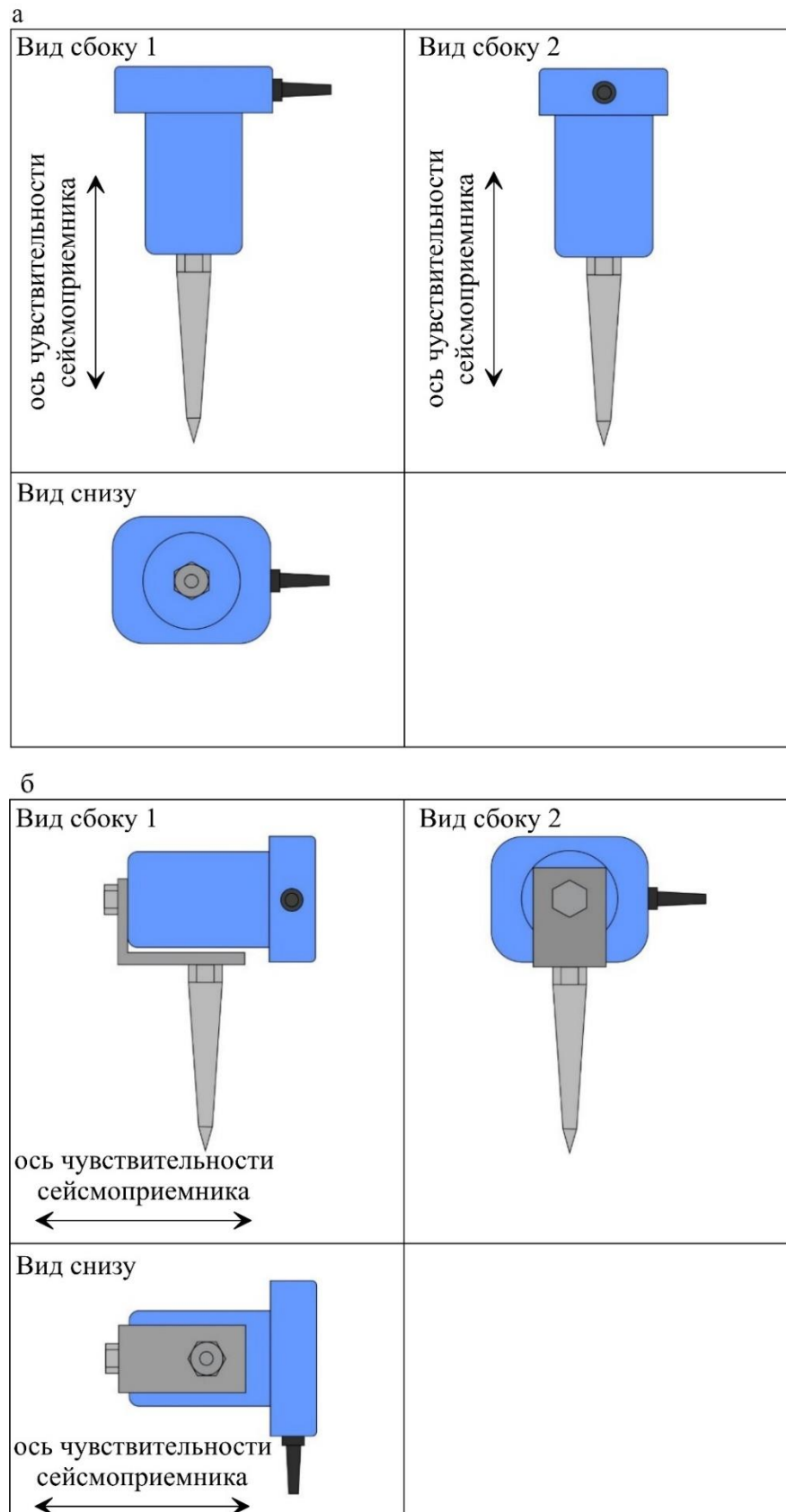


Рисунок 44 – Конструкция крепления сейсмоприемников в подошву выработки:

а – вертикальных; б – горизонтальных (по данным автора [92, 224])

Характеристика полевых материалов, полученных в рамках физического моделирования. Полевые работы в рамках натурных измерений проведены с использованием переменной регистрирующей расстановки, изменяющейся от фланговой до центральной в начале профиля, и от центральной до фланговой в конце профиля (рисунок 45). В целом полученные сейсмограммы можно разделить на 3 типа по качеству полученного полевого материала.

1. Высокого качества (рисунок 46), на таких сейсмограммах после полосовой фильтрации и амплитудной регулировки отчетливо прослеживаются оси синфазности отраженных волн. Такие сейсмограммы наблюдаются при установке приемников на прямой ножке либо на прижимные крепления.

2. Удовлетворительного качества (рисунок 47), на этих сейсмограммах оси синфазности отраженных волн видны плохо из-за низкого отношения сигнал-помеха. Они наблюдаются при *несовпадении ориентации сейсмоприемников и направления возбуждения колебаний*.

3. Неудовлетворительного качества (рисунок 48) – порядка 43 % от всех полученных сейсмограмм, эти сейсмограммы не несут информации об отражающих границах из-за искажающего влияния Г-образных и О-образных креплений, вне зависимости от направления возбуждения, ориентации линии приема, типа датчиков и условий возбуждения. Отношение сигнал-помеха для этих сейсмограмм намного меньше 1, что не позволяет использовать их в работе. Из-за указанного явления невозможно получить кондиционные полевые материалы, в связи с этим крепления с О-образных заменены на прижимные и добавлен профиль на прижимных П-образных креплениях.

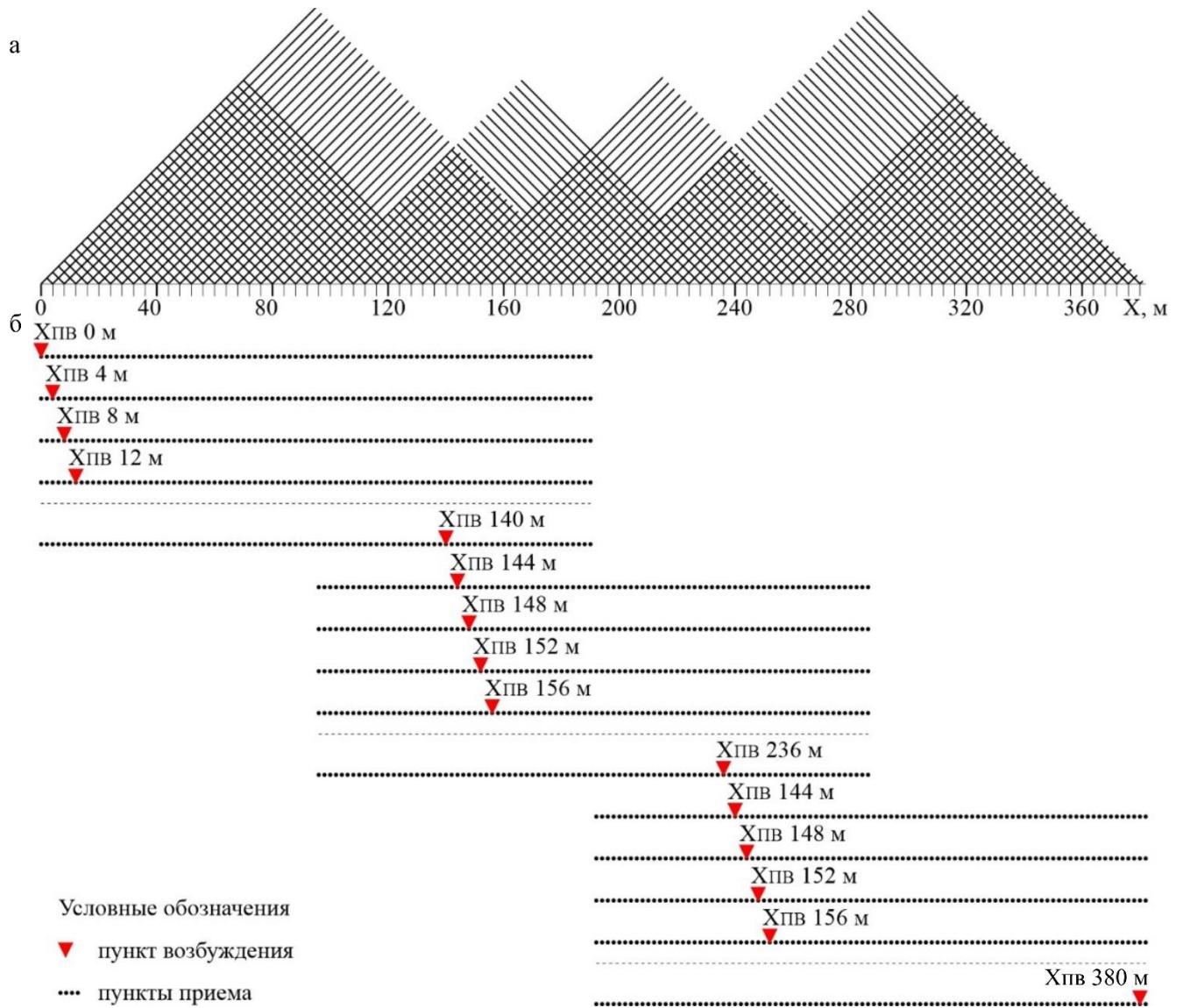


Рисунок 45 – Система наблюдений шахтных сейсморазведочных исследований в горных выработках на примере профиля длиной 380 м: а) на обобщённой плоскости; б) на схеме отработки полевых сейсмограмм (по данным автора [224])

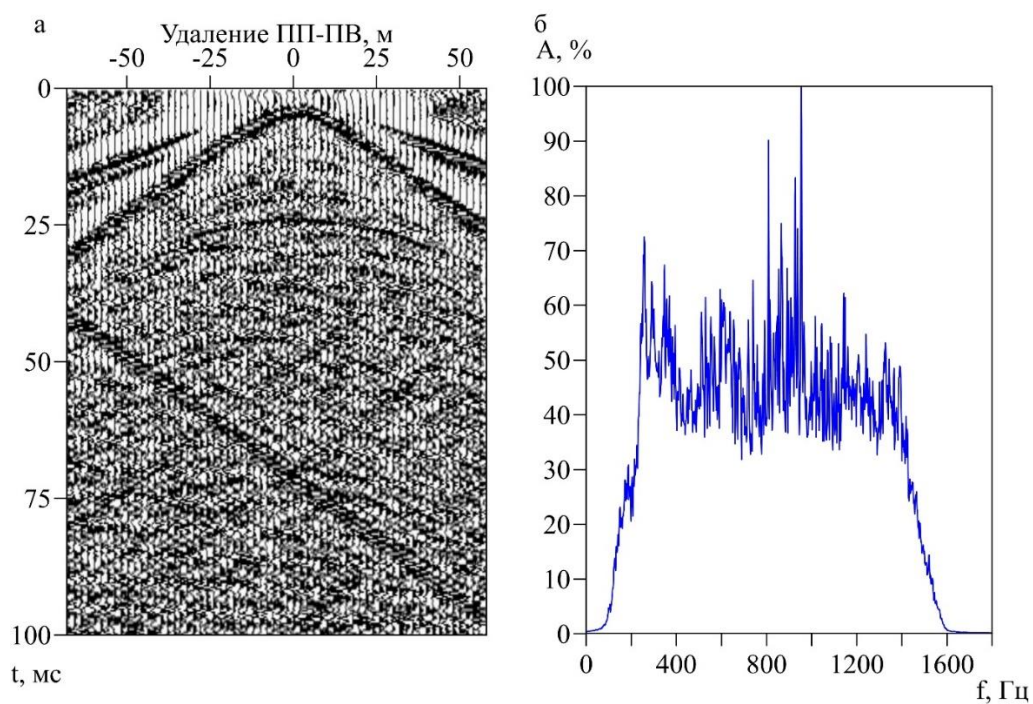


Рисунок 46 – Сейсмограмма ОПВ по профилю 7.1 (штыревые крепления) после амплитудной регулировки и частотной фильтрации (а) и соответствующий ей спектр (б) (по данным автора)

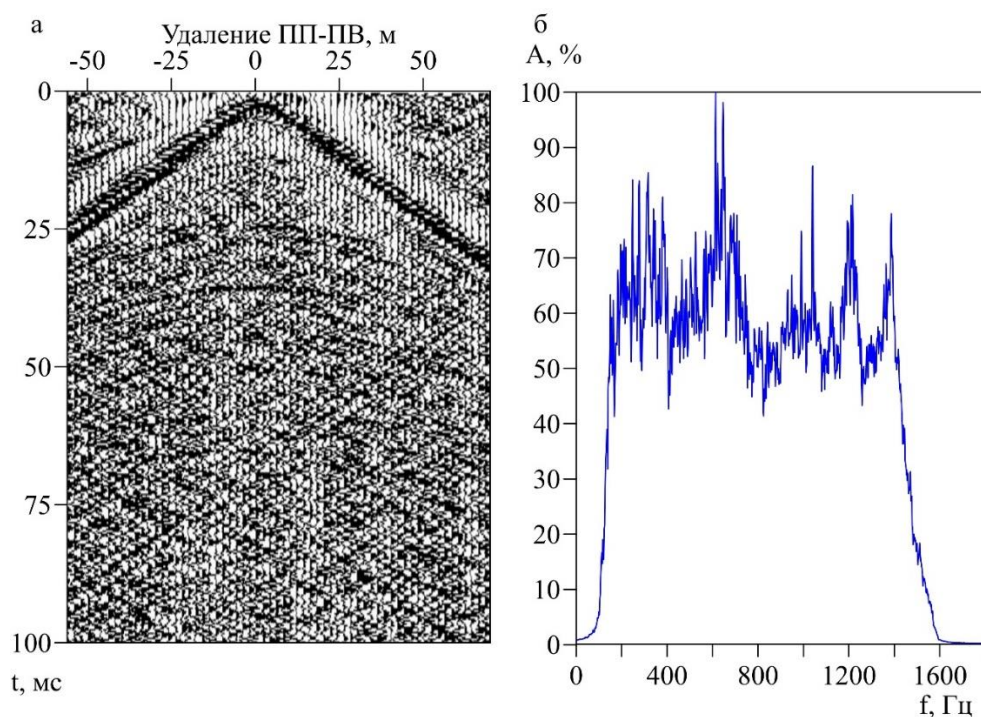


Рисунок 47 – Сейсмограмма по профилю 1.3 (О-образные крепления) после амплитудной регулировки и частотной фильтрации (а) и соответствующий ей спектр (б) (по данным автора)

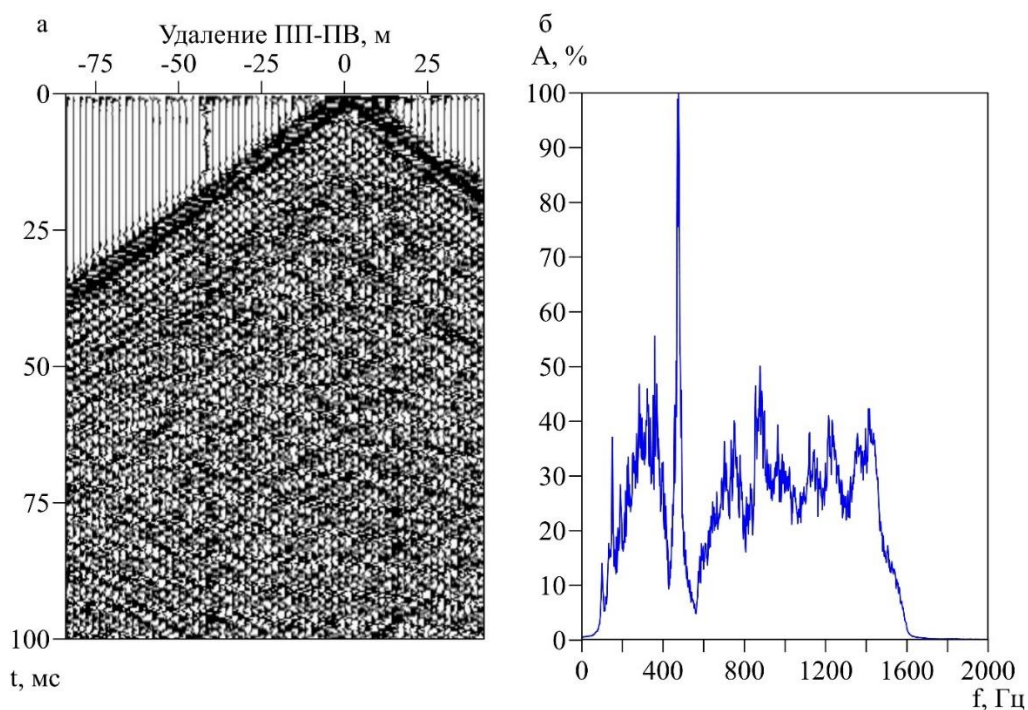


Рисунок 48 – Сейсмограмма по профилю 2.3 (О-образные крепления) после амплитудной регулировки и частотной фильтрации (а) и соответствующий ей спектр (б) (по данным автора)

Анализ результатов профильных натурных экспериментов. На сейсмограммах без обработки отмечаются только прямые Р- и прямые S-волны, а также довольно выразительные дифрагированные волны от сопряжений с другими выработками. Оценка скоростей распространения упругих волн по годографам прямой волны показывает, что скорость продольной волны составляет порядка 4500 м/с, а поперечной порядка 2500 м/с (рисунок 49).

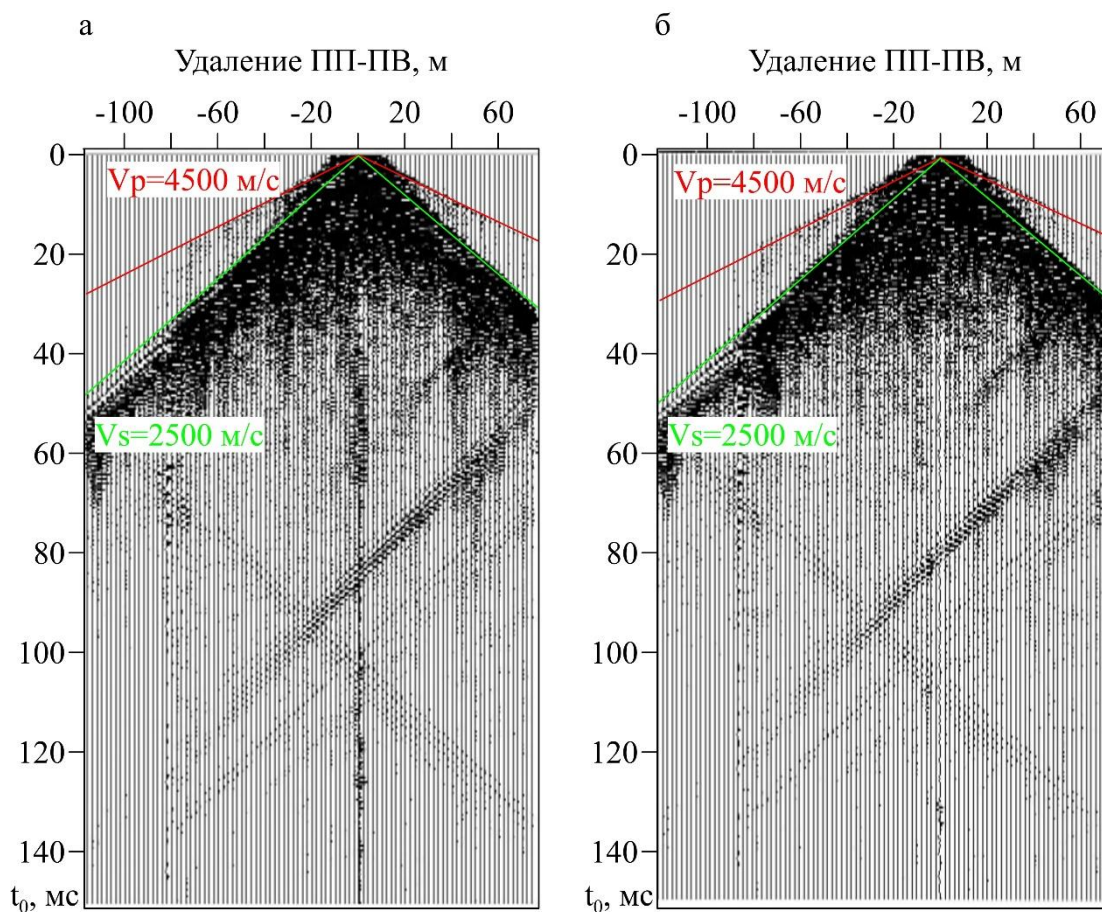


Рисунок 49 – Типичные сейсмограммы ОПВ, зарегистрированные в условиях соляных шахт (по данным автора [206])

Граф обработки, достаточный для получения первичных разрезов содержит минимально необходимый набор процедур, характерный для обработки материалов МОВ ОГТ – амплитудную коррекцию, полосовую фильтрацию, ввод кинематических поправок, суммирование по общей глубинной точке, и, при необходимости, миграцию. На сейсмограммах, обработанных с применением указанных процедур, даже с усредненными параметрами, хорошо видны годографы отраженных волн (рисунок 50).

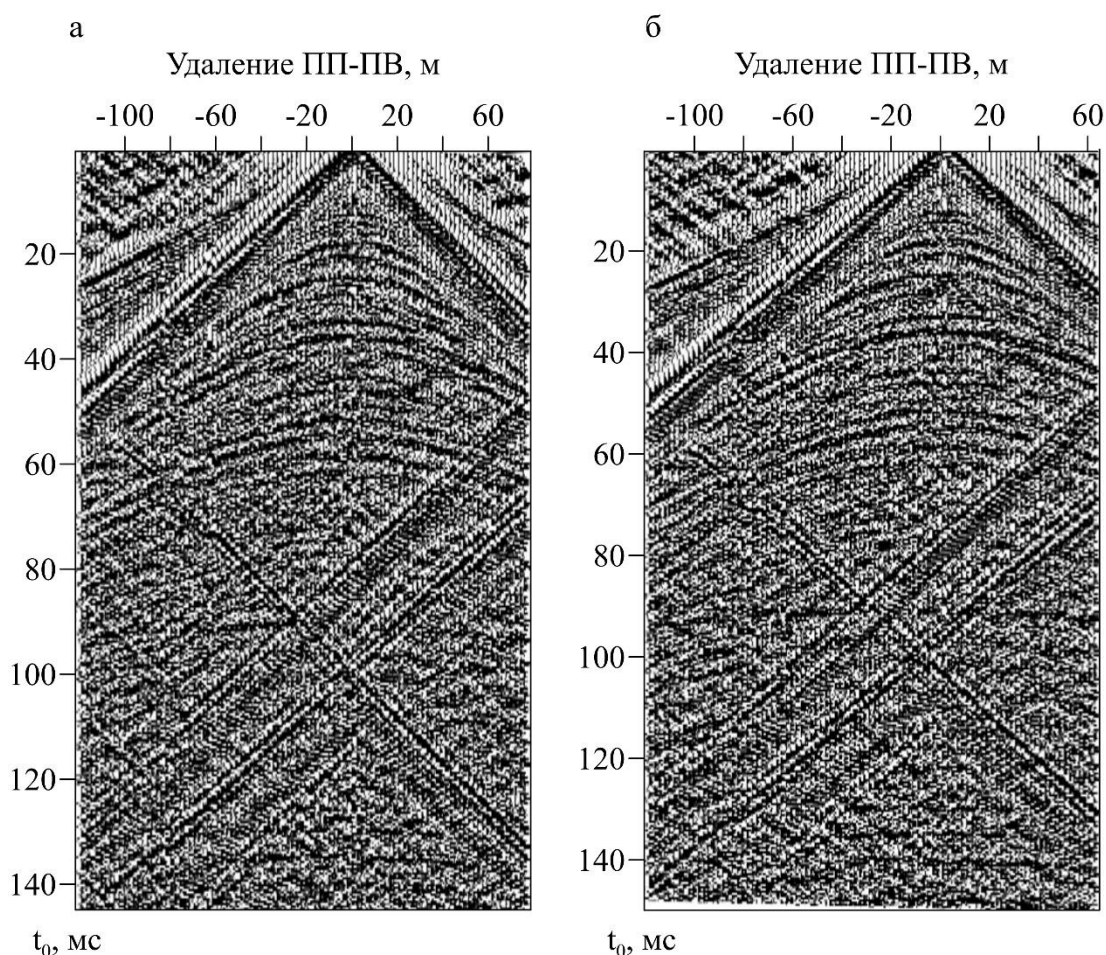


Рисунок 50 – Сейсмограммы ОПВ с рисунка 36 после первичной обработки (по данным автора [206])

В результате оценки полученных первичных разрезов (рисунок 51) подтвердилось, что Г-образные и О-образные ножки (крепления) вносят критические искажения в форму записи, что проявляется и на сейсмограммах, как во временной, так и в частотной области.

Интерпретация результатов шахтной сейсморазведки – глубинных сейсмических разрезов – направлена на выявление структурных особенностей сейсмогеологического разреза и прослеживание отражающих границ, иначе говоря – на построение геофизической модели горного массива. Основными отражающими границами, к которым производится привязка сейсморазведочных данных, полученных шахтной сейсморазведкой в пределах ВКМС, являются: кровля покровной каменной соли (кПКС), кровля карналлитовой пачки (кКП), пласт маркирующей глины (МГ) и кровля нижней переходной пачки (кНПП).

Также отмечаются отражения от штреков, расположенных параллельно профилю исследований (рисунок 39).

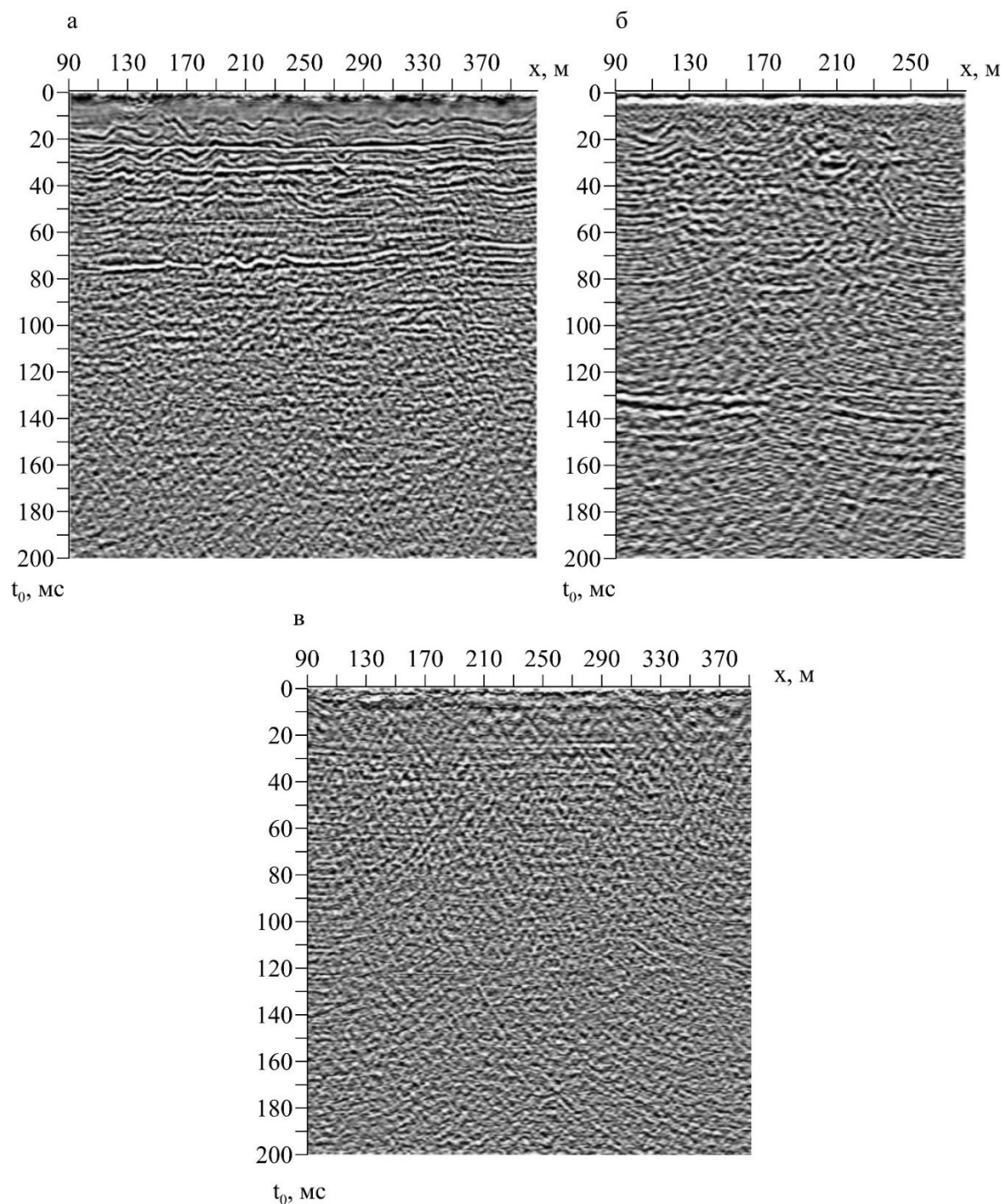


Рисунок 51 – Сравнение первичных разрезов полученных по опытным профилям:
а – профиль 7.3 (штыревые крепления); б – профиль 2.3 (О-образные крепления);
в – профиль 8.1 (Г-образные крепления) (по данным автора [92, 224])

Полученные сейсмические разрезы указывают на ряд закономерностей в плане наличия отражений от указанных геологических границ и выработок, и их относительной интенсивности в зависимости от типа и положения сейсмоприемников и ориентации источника (рисунки 52, 53, 54).

Поскольку все результаты, полученные с сейсмоприемниками на Г-образных креплениях, оказались некондиционными из-за их искажающего влияния, в качестве примера приведена только часть разрезов, полученных с вертикальными сейсмоприемниками на Г-образных креплениях, закрепленными в кровле выработки (рисунок 53, верхний ряд). На указанных разрезах, просуммированных со скоростью S-волн, регистрируются отраженные S-волны от боковых выработок, и отражения сверху и снизу на обменной PS-волне. На разрезах, просуммированных со скоростью P-волн, отраженные P-волны отсутствуют, однако на них отмечаются отражения на S-волнах, просуммированные со скоростью P-волн.

Анализ полученных материалов показывает, что на некоторых временных разрезах отмечаются отражения, пришедшие сверху и снизу: например, при возбуждении колебаний в южную или северную стенку выработки и регистрации сигнала горизонтальными сейсмоприемниками (рисунки 52, 53, 54 а–г, обозначены синим цветом). На других разрезах – отражения, пришедшие справа и слева от соседней выработки: при возбуждении колебаний в кровлю или подошву выработки и регистрации сигнала как горизонтальными, так и вертикальными сейсмоприемниками (рисунки 52 – 54, обозначены красным цветом).

Также отмечаются такие комбинации взаимного расположения источников и приемников, при которых на разрезах одновременно фиксируются отражения, пришедшие снизу, сверху и с горизонтальных направлений. Подобное явление наблюдается, например, при возбуждении упругих колебаний в северную и южную стенку выработки и регистрации сигнала вертикальными датчиками, установленными в почву выработки, при возбуждении колебаний в кровлю или подошву выработки и регистрации сигнала горизонтальными датчиками, установленными в стенки выработки (рисунки 52 – 54).

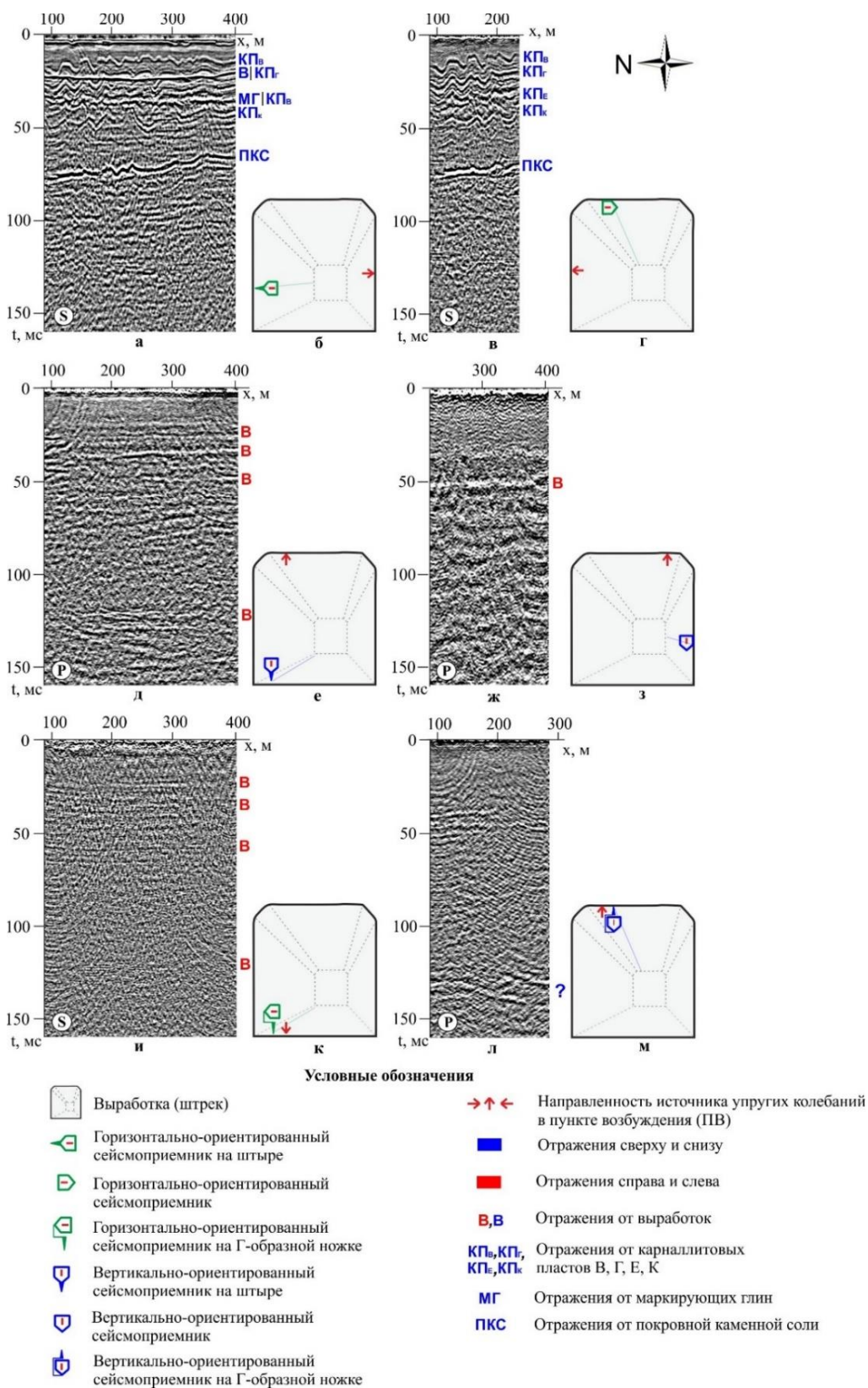


Рисунок 54 – Временные разрезы, полученные с различными комбинациями установки и типа сейсмоприемников и ориентации ударов источника. Справа от каждого разреза показано положение сейсмоприемника, его направленность и ориентация ударов источника (по данным автора [92, 224])

Среди отражений, пришедших *из верхнего полупространства*, отмечаются отражения от карналлитовых пластов В, Г, Е, К, и от покровной каменной соли. *Из нижнего полупространства* наблюдаются отражения от выработок, и пласта маркирующей глины. Также на разрезах на расстоянии 320 м от выработки, где проводились сейсморазведочные исследования, отчетливо прослеживается отражение от кНПП, находящейся на глубине порядка 300 м относительно рабочей выработки. На приведенных разрезах данное отражение не представлено, так как разрезы для бóльшей наглядности представлены в сильно увеличенном вертикальном масштабе.

Максимальное расстояние в горизонтальном направлении от рабочего штрека до выработки, от которой фиксируется устойчивое отражение, составляет 300 м. В среднем мощность соляной толщи над рабочей выработкой составляет 85–100 м, самым дальним отражением, относящимся к верхней части соляной формации, является отражение от кровли верхнего пласта каменной соли.

Анализ результатов выполненных натурных исследований позволяет сделать следующие выводы.

1. При исследованиях на Р-волнах в частотном диапазоне до 1000 Гц отражений от геологических границ внутри соляной толщи практически не отмечается (рисунок 54, д–з). Причин может быть несколько, среди них можно выделить особенности формирования отраженных Р-волн внутри соляной толщи, интерференцию их с более интенсивными S-волнами и колебаниями, происходящими вокруг выработки. Причину в виде недостаточности частотного диапазона аппаратуры скорее всего можно исключить, так как из полученных результатов видно, что отражения на S-волнах фиксируются уверенно, при этом их частотный состав очень близок частотному составу Р-волн.

2. Одновременно при исследованиях на Р-волнах наблюдаются отражения от дальних выработок, а также от кровли (возможно) и подошвы соляной формации (от кровли ПКС и подошвы ПдКС), в зависимости от ориентации источника и местоположения приёмников. Данный факт говорит о наличии выраженной направленности Р-волн в направлении удара. При этом

отражения на продольных волнах зафиксированы только в случаях, когда местоположение сейсмоприемника и ПВ совпадает, а также совпадают и направленности источника и приемников.

3. Во всех случаях, когда ориентация источника совпадает с направленностью сейсмоприемников, регистрируются интенсивные отражения на S-волнах. Причиной является совпадение направление движения частиц во фронте S-волн с направленностью сейсмоприемников. При горизонтальной ориентации ударов регистрируются отражения от геологических границ сверху и снизу (в том числе от границ внутри соляной формации) и от выработки снизу (рисунок 54, а–г). При вертикальной ориентации ударов фиксируются отражения от боковых выработок (рисунок 54, д–з).

4. Исходя из наблюдений, описанных в предыдущем пункте, следует вывод о наличии у источника S-волн типа «сосредоточенная сила» выраженной направленности – она перпендикулярна (радиальна), или почти перпендикулярна ориентации удара. Данный вывод совпадает с информацией о направленности источника S-волн в шахтных условиях, изложенные в [34].

5. В некоторых случаях наблюдаются весьма информативные отражения на S-волнах, приходящие с направлений, не соответствующих направленности источника S-волн. Речь идет о случаях, когда ориентация удара и направленность сейсмоприемников не совпадают. Данный факт можно объяснить либо тем, что в непосредственной близости от выработки происходит преобразование типа волн – P в S и S в P, либо тем, что волна огибает выработку без преобразования типа, но с искривлением фронта волны, то есть происходит явление, близкое по природе к дифракции. Данные отражения имеют примерно на порядок меньшую амплитуду, чем при совпадении ориентации ударов источника и направленности приемников. Можно предположить, что эти отражения формируются всегда, но различить их на записях возможно только в случае, когда ориентация ударов источника и направленность сейсмоприемников не совпадают. В ином случае они становятся неразличимы на фоне значительно более интенсивной S-волны,

распространяющейся в соответствии с исходной направленностью источника S-волн.

6. Использование угловых и других креплений сложной формы должно быть полностью исключено, поскольку в рассматриваемом частотном диапазоне они вносят критические искажения в регистрируемый сигнал, что не позволяет получать кондиционный материал (рисунок 54, и–м).

7. Крепление в виде обычного штыря при установке его в заранее просверленные отверстия, позволяет получать кондиционный материал (рисунок 54, а, б). Однако наилучшее качество материала получается при использовании прижимных креплений, позволяющих обеспечить непосредственный контакт корпуса сейсмоприемников с горной породой (рисунок 54, в, г).

8. Отмечается эффект экранирования волны выработкой. Он проявляется, когда сейсмоприемник стоит на стороне выработки, противоположной направлению прихода отраженной волны. Так, на фоне отражений от складчатых геологических границ мы четко видим контрастное горизонтальное отражение от нижележащей выработки на времени около 20 мс (рисунок 54, а), а на рисунке 40, в, его различить практически невозможно. Данный эффект можно использовать для получения отражений преимущественно с необходимой стороны от выработки, которая будет играть роль экрана.

9. На расстоянии от линии приема порядка до 7–10 м не наблюдается отражений ни от выработок, ни от геологических границ. Это связано с особенностями структуры волнового поля, когда первые вступления перекрывают целевой интервал. Эффект слепой зоны можно минимизировать за счет уменьшения шага между ППр, увеличения частоты регистрируемого сигнала и уменьшения шага дискретизации.

10. На временных разрезах, получаемых в шахтных условиях, на поперечных волнах наблюдается эффект интерференции отражений, приходящих из нижнего и верхнего полупространств, а также отражений от выработок сбоку (рисунок 54, а). В связи с этим, возникает необходимость разработки способа (или

нескольких способов) разделения данных отражений для построения разрезов, преимущественно содержащих отражения из нужного полупространства.

Заверочные профильные исследования. Для заверки выводов, приведенных в выше, пройден опытный сейморазведочный профиль длиной 876 м (рисунок 55, а) [224]. Целью данного исследования было подтвердить выводы, сделанные по результатам натурных профильных экспериментов на коротких профилях. Для этого выполнены работы с двумя сочетаниями источников и приемников – первый вариант с установкой вертикальных сейсмоприемников в почву выработки и возбуждением колебаний в кровлю, второй вариант – с установкой горизонтальных сейсмоприемников в стену выработки на прямой ножке и возбуждением колебаний также в стену выработки.

Полевые материалы, полученные с вертикальными сейсмоприемниками, были подвергнуты обработке для получения разреза поперечных и разреза продольных волн. На разрезе для поперечных волн, полученном с постоянной скоростью 2.45 км/с, четко выделяются только два отражения, однозначно ассоциируемые с соседними выработками, отстоящими от профиля в горизонтальном направлении на расстоянии 31 и 68 м (рисунок 55, б). Других отражений, в том числе от геологических границ, на данном разрезе выявить не представляется возможным. Кроме того, отмечаются участки потери корреляции отражений от соседних выработок, связанные с примыкающими выработками (рисунок 55, а, б). Таким образом, подтверждается вывод об экранирующем эффекте выработок, а подобные участки потери корреляции при некорректной интерпретации могут быть ошибочно приняты за участки осложнения геологического строения.

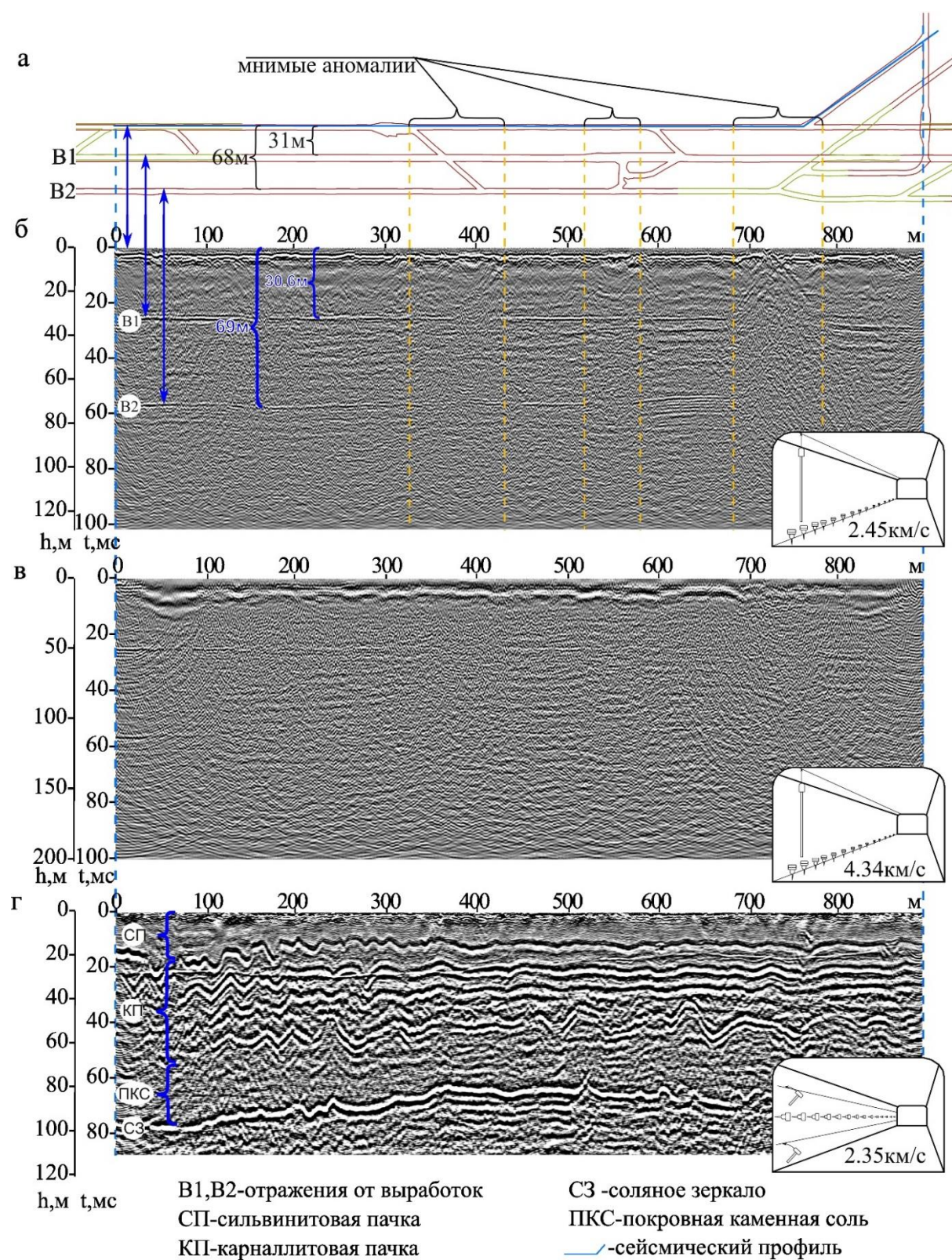


Рисунок 55 – Разрезы по опытному профилю: а – схема исследований, разрезы, полученные: б – для вертикального возбуждения колебаний и скорости 2.45 км/с, в – для вертикального возбуждения колебаний и скорости 4.34 км/с, г – для горизонтального возбуждения колебаний и скорости 2.35 км/с (по данным автора [224])

На разрезе для продольных волн, полученном для скорости 4.34 км/с, контрастных отражений нет совсем, что подтверждает вывод о невозможности изучения строения соляной толщи на продольных волнах с рассматриваемой комбинацией источников и приемников и на существующем технологическом уровне (рисунок 55, в).

Резкий контраст с разрезами, представленными на рисунках 41, б, в, демонстрирует разрез, полученный на горизонтальных датчиках при горизонтальном же возбуждении упругих колебаний (рисунок 55, г). Он просуммирован со скоростью 2.35 км/с, характерной для поперечных волн, и насыщен отражениями от геологических границ. Отметим, что скорость в вертикальной плоскости несколько меньше, чем в горизонтальной – 2.35 км/с и 2.45 км/с соответственно. Данный факт, вероятнее всего, связан с анизотропией скоростей, вызванной субгоризонтальной слоистостью ВКМС.

Качественная оценка данного разреза позволяет сделать заключение о его высокой информативности [79] – на нем зафиксировано порядка десяти осей синфазности, большинство из которых характеризуются высокой контрастностью и коррелируемостью. Привязка к данным бурения показывает, что большинство отражений на разрезе пришло из верхнего полупространства, и в них проявляются все основные элементы геологического разреза ВЗТ – кровля СП/подошва КП, ряд границ в КП, кровля КП/подошва ПКС, кровля ПКС/подошва СМТ (рисунок 55, г). Также на времени 20–25 мс отмечается отражение от МГ, пришедшее снизу, и интерферирующее с отражениями от геологических границ внутри КП.

Характер описываемых отражений резко отличается от характера отражений, получаемых при выполнении сейсморазведочных работ на поверхности земли. Основная особенность волновой картины в том, что на ней четко выделяется большое количество складок различного порядка, описанных в работе [71], в том числе высокоамплитудные складки высотой до 15 м. Часть складок прослеживается по всей КП, часть залегает несогласно со вмещающими слоями. В начальной части профиля наблюдается увеличение мощности ВЗТ, в средней части – уменьшение, что также подтверждается результатами бурения

скважин. Также обращает на себя внимание тот факт, что наиболее интенсивная складчатость концентрируется в интервале пикетов от 0 до 400 м, а на остальной части профиля большинство отражений имеет относительно спокойный характер. Указанное явление связано с тем, что начальная часть профиля пройдена по восточному склону Харюшинского поднятия, а на склонах поднятий, как известно, складчатость солей значительно более интенсивна, чем на участках горизонтального залегания [150, 309], что и зафиксировано сейсморазведочными работами.

Описанные закономерности в совокупности с соответствующими методиками полевых работ приведены ниже (рисунок 56). Видно, что использование стандартной методики, которая предполагает возбуждение упругих колебаний вертикальными ударами в кровлю выработки и регистрацию отражений вертикальными сейсмоприемниками, установленными в почву, не приводит к получению сейсмических разрезов с контрастными отражениями, коррелируемыми с геологическими границами, известными по априорным данным (рисунок 56, а). В противоположность этому, применение горизонтально-направленных ударов и горизонтальных сейсмоприемников, устанавливаемых в стену выработки, приводит к получению сейсмических разрезов с весьма контрастными и выдержанными отражениями, ассоциируемыми с известными геологическими границами (рисунок 56, б).

Таким образом, заверочные профильные исследования подтверждают выявленные закономерности распространения упругих волн, установленные в результате математического моделирования и натурных экспериментов.

Выводы по результатам математического моделирования и натурных экспериментов. По результатам описанных экспериментальных работ установлены новые, неизвестные ранее факты о закономерностях распространения упругих волн в условиях подземной разработки соляных месторождений, что потребовало тщательного осмысления и систематизации. Совершенно неожиданным стал тот факт, что на продольных волнах отражений от геологических границ в солях практически не наблюдается, при этом на поперечных волнах регистрируются

очень четкие отражения, объективно отображающие геологическое строение. Данное наблюдение стало основополагающей предпосылкой для дальнейших исследований, позволивших добиться прорыва в разработке эффективной методики шахтных сейсмических исследований в условиях месторождений солей.

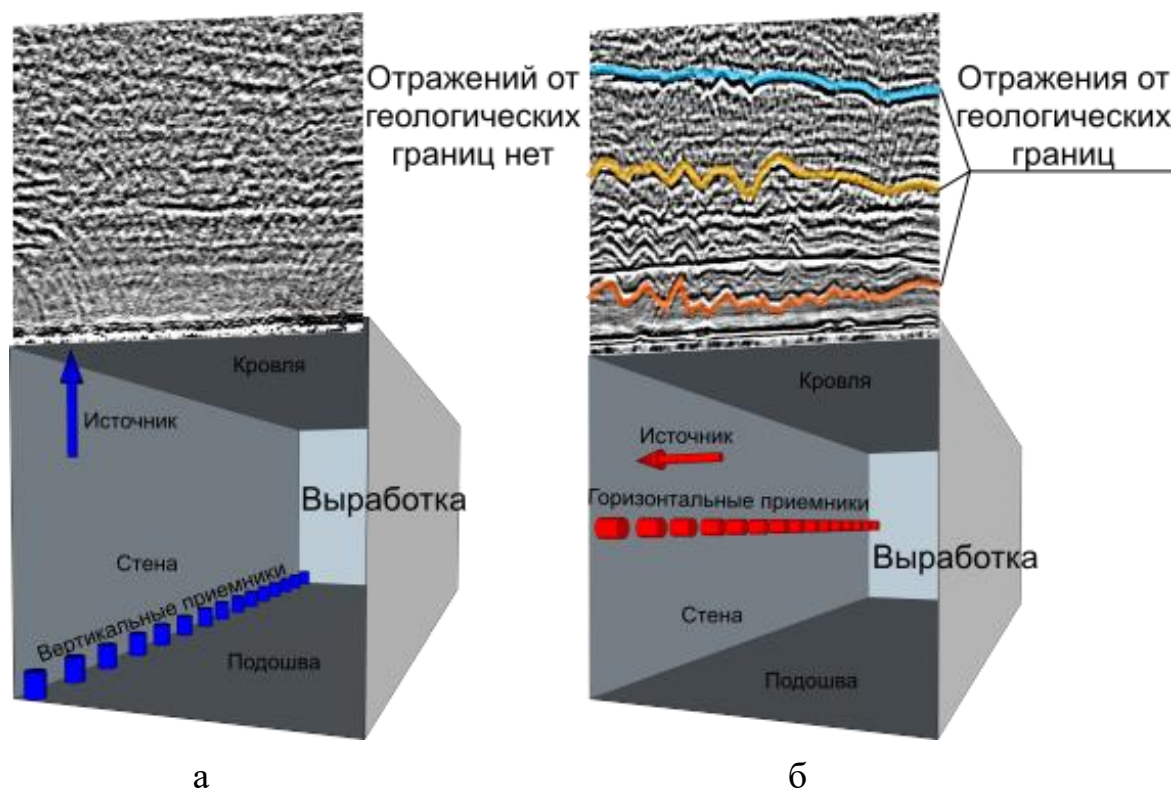


Рисунок 56 – Схемы проведения полевых работ (снизу) совмещенные с соответствующими ими сейсмическими разрезами (сверху): а – стандартная методика (отражения от границ ИГЭ и РЭ не четкие), б – нестандартная методика (есть четкие отражения от границ ИГЭ и РЭ) (по данным автора)

Результаты натурных экспериментов по базовым положениям хорошо согласуются с результатами математического моделирования волнового поля. *Основополагающие выводы, определяющие параметры эффективного метода шахтных сейморазведочных работ в условиях подземной разработки соляных месторождений, в обобщенном виде приведены ниже.*

1. На Р-волнах получить отражения от геологических границ в соляной толще невозможно.
2. S-волны позволяют получить высококонтрастные отражения от

геологических границ в соляной толще.

3. Существует эффект экранирования отраженных волн выработкой, что необходимо учитывать при выборе положения регистрирующей установки и источника упругих колебаний. Также данный эффект можно использовать в целях устранения интерференции целевых волн и волн-помех.

4. Направленность источника S-волн типа «сосредоточенная сила» в условиях соляных шахт перпендикулярна по отношению к оси приложения нагрузки, либо имеет незначительное отклонение от перпендикулярного направления. Иными словами, при исследованиях на S-волнах ось приложения нагрузки должна быть перпендикулярна направлению исследований.

5. Виды возможных креплений сейсмоприемников в условиях соляных шахт сводятся всего к двум типам – ножка-штырь, либо прижимное крепление. Любые сложные виды креплений исключаются ввиду сильного искажающего эффекта.

6. Наилучшим вариантом для изучения ВЗТ на S-волнах, с точки зрения информативности получаемых данных, является крепление горизонтальных сейсмоприемников к кровле выработки прижимными креплениями, и возбуждение упругих колебаний горизонтальными ударами в стену выработки.

7. С учетом требований к производительности работ, наилучшим вариантом изучения ВЗТ на S-волнах, является крепление горизонтальных сейсмоприемников к стене выработки на ножках-штырях в заранее просверленные отверстия, и возбуждение упругих колебаний горизонтальными ударами в стену выработки.

8. Рассмотренный в п. 7 вариант выполнения работ приводит к интерференции отраженных волн, приходящих к приемной расстановке из нижнего и верхнего полупространств, то есть требуется разработка методики разделения указанных отражений.

2.3 Метод шахтных сейсморазведочных работ ПВРО

2.3.1 Основы метода шахтной сейсморазведки ПВРО

На основании закономерностей, установленных в ходе теоретических и натурных экспериментов, описанных в главах 2 и 3, разработан метод шахтных сейсморазведочных работ на поперечных волнах с разделением отражений (ПВРО). Метод позволяет строить детальные геофизические модели ПТС в условиях подземной разработки соляных месторождений [207, 211, 224]. В основу метода положено использование S-волн, позволяющих получать контрастные отражения от геологических границ в интервале соляной толщи. Как и любой геофизический метод, метод шахтной сейсморазведки ПВРО включает в себя два крупных взаимосвязанных раздела – методику выполнения полевых работ, и методику камеральной обработки.

Взаимосвязь разделов связана с необходимостью согласования методики полевых работ и методики камеральной обработки – граф обработки должен учитывать параметры регистрирующей установки и ее геометрию, параметры регистрации, формат данных, и т.д. Технология поверхностных работ МОВ МОГТ на данный момент является хорошо разработанной и отлаженной [236]. Имеется масса программных продуктов для расчета полевых систем наблюдения, контроля качества, обработки и интерпретации получаемых материалов, учитывающих все особенности технологии проведения полевых работ. Поэтому большинство разработок в МОВ МОГТ на данный момент носят односторонний характер – это усовершенствование либо аппаратурной, либо программной части.

Как уже было показано, наилучшие результаты при исследованиях верхнего полупространства для оценки состояния и свойств ВЗТ, достигаются с использованием горизонтально–ориентированных сейсмоприемников, закрепленных на прижимных креплениях в кровле выработки, совместно с горизонтально–ориентированными ударами в стену выработки. Однако, такой способ крепления является слишком трудозатратным для практического использования. Поэтому для поточных работ предлагается использовать крепление

горизонтально–ориентированных сейсмоприемников на стену выработки в заранее просверленные отверстия на прямой ножке от вертикально–ориентированных сейсмоприемников, совместно с горизонтально направленными ударами также в стену выработки (рисунок 57, а). Такой вариант выполнения работ более оперативен, но при этом регистрируются интерферирующие отражения из обоих полупространств – верхнего и нижнего [112-114]. Данное явление предопределило необходимость разработки способов разделения отражений, приходящих из разных полупространств. Способ должен быть комплексным, поскольку затрагивает технологию проведения и полевых, и камеральных работ.

Идея метода шахтной сейсморазведки ПВРО заключается в следующем. На этапе полевых исследований работы *выполняются с двумя линиями возбуждения*, сдвинутыми в разные стороны относительно единственной линии приема (рисунок 57, рисунок 58, а). Такой подход дает возможность получить два набора данных, в которых отраженные волны от одноименных отражающих границ сдвинуты относительно друг друга на время, соответствующее расстоянию между линиями пунктов возбуждения (рисунок 57, б). На этапе камеральных работ взаимные математические преобразования полученных массивов позволят разделять отражения, приходящие из разных полупространств, и, как следствие, получать отображения геологического строения нужного полупространства (рисунок 57, рисунок 58, в). Итоговый, или сводный разрез – геофизическая модель ПТС, получается путем совмещения разрезов, относящихся к разным полупространствам (рисунок 57, г).

Кроме вертикальной плоскости (рисунок 58, а), исследования можно проводить и в любой другой плоскости, для этого вся система наблюдения разворачивается на соответствующий угол. Например, для наблюдений в горизонтальной плоскости применяются вертикальные сейсмоприемники на прямой ножке, которые устанавливаются в почву подземного сооружения, возбуждение упругих колебаний при этом выполняется вертикальными ударами также в почву выработки (рисунок 58, б). Для исследований в плоскости, отличной от вертикальной и горизонтальной, выбираются всенаправленные

сейсмоприемники, а возбуждение колебаний выполняется в направлении, перпендикулярном плоскости исследований (рисунок 58, в).

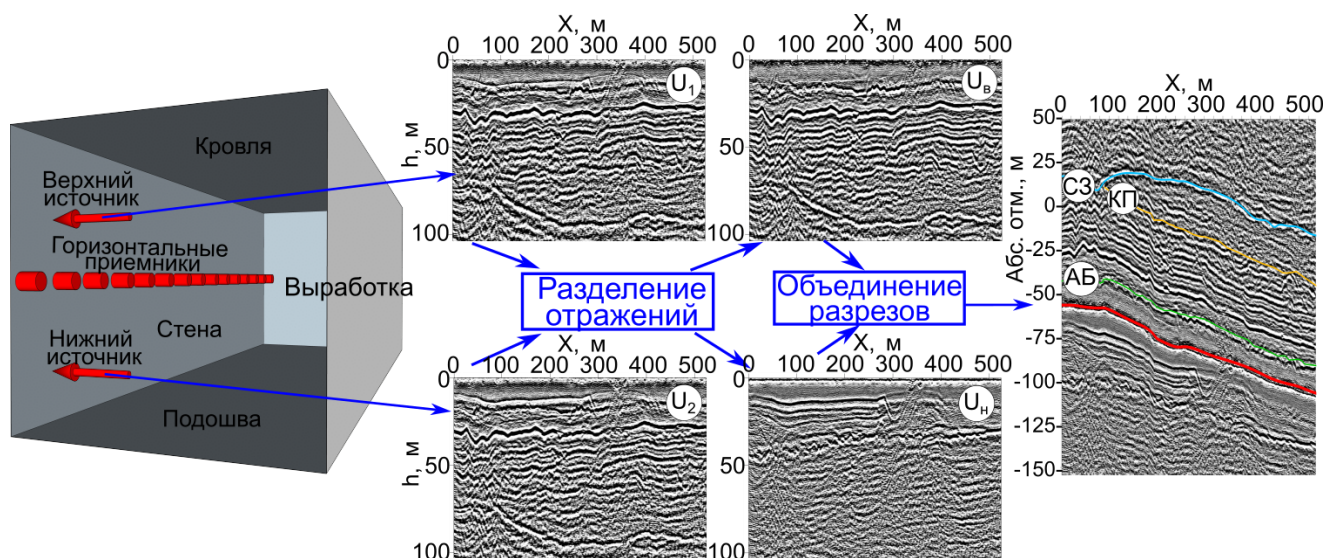


Рисунок 57 – Блок-схема разработанного метода шахтной сейсморазведки: а – схема выполнения полевых работ, б – разрезы для верхней и нижней линий возбуждения, в – разрезы после разделения отражений из нижнего и верхнего полупространства, г – сводный разрез – геофизическая модель ПТС (по данным автора [214])

Всего разработано 3 камеральных способа разделения отражений, приходящих из разных полупространств [102, 191]. Первый из них основан на вычитании регистрируемых волновых полей со сдвигом, соответствующим расстоянию между линиями пунктов возбуждения, использованному на этапе выполнения полевых работ. Второй способ использует функцию взаимной корреляции между трассами двух наборов данных, соответствующих разным линиям пунктов возбуждения, и требует разработки специального программного обеспечения. Третий способ предполагает сравнение времён пикировок для одних и тех же горизонтов, и определение на этой основе направления, откуда пришли отражения. За основной принят способ №1, поскольку он является самым оперативным, для его реализации возможна адаптация уже имеющегося программного обеспечения, получаемые в результате разрезы являются очень наглядными и легко интерпретируемыми.

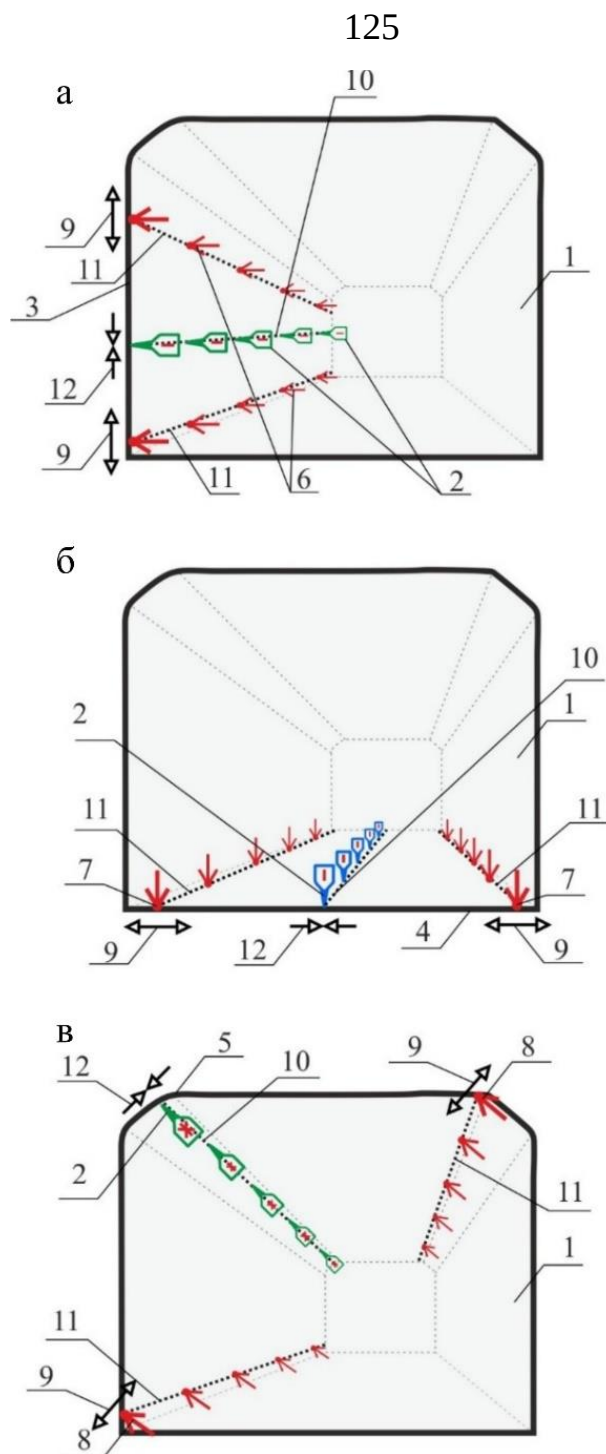


Рисунок 58 – Схема выполнения полевых сейсморазведочных работ методом ПВРО при исследованиях в вертикальной (а), горизонтальной (б) и наклонной (в) плоскостях: 1 – горная выработка; 2 – сейсмоприемник; 3 – стенка горной выработки; 4 – подошва горной выработки; 5 – кровля горной выработки; 6 – горизонтально-направленные удары; 7 – вертикально-направленные удары; 8 – наклонные удары; 9 – направление распространения поперечной волны от источника; 10 – линия приема; 11 – линия возбуждения; 12 – направление прихода отраженной волны (по данным автора [191])

Математически, способ разделения описывается следующим образом [224].

Рассмотрим систему уравнений:

$$\begin{cases} U_1(t) = U_{up}(t) + U_{btm}(t) & 19 \\ U_2(t) = U_{up}(t + \Delta t) + U_{btm}(t - \Delta t) & 20 \end{cases}$$

где t – время прихода отраженных волн к приемной линии, Δt – разница времени прихода отраженных волн от нижней и верхней линий возбуждения, $U_{up}(t)$ – поле отраженных волн, приходящих из верхнего полупространства, $U_{btm}(t)$ – поле отраженных волн, приходящих из нижнего полупространства, $U_1(t)$ – суммарное поле отраженных волн, приходящих из верхнего и нижнего полупространств для верхней линии возбуждения, $U_2(t)$ – суммарное поле отраженных волн, приходящих из верхнего и нижнего полупространств для нижней линии возбуждения.

Уравнение (19) можно представить в виде $U_1(t + \Delta t) = U_{up}(t + \Delta t) + U_{btm}(t + \Delta t)$, из чего можно записать следующее:

$$U_{up}(t + \Delta t) = U_1(t + \Delta t) - U_{btm}(t + \Delta t) \quad 21$$

Подставив выражение (21) в уравнение (20), и выполнив преобразования, мы получим:

$$U_{btm}(t - \Delta t) - U_{btm}(t + \Delta t) = U_2(t) - U_1(t + \Delta t) \quad 22$$

Выполнив аналогичные преобразования с уравнением (20), и подставив получившееся выражение в уравнение (19), получим:

$$U_{up}(t + \Delta t) - U_{up}(t - \Delta t) = U_2(t) - U_1(t - \Delta t) \quad 23$$

Легко видеть, что левая часть выражения 22 содержит разницу полей отраженных волн, приходящих только снизу со сдвигом по времени $2\Delta t$, а левая часть выражения 23 содержит разницу полей отраженных волн, приходящих только сверху также со сдвигом по времени $2\Delta t$. Правая часть выражений 22 и 23 содержит разницу суммарных полей отраженных волн для верхней и нижней линий возбуждения, зарегистрированных приемной линией в моменты времени t и $t \pm \Delta t$ соответственно. Из выражений 22 и 23 следует, что если расстояние между линиями возбуждения выбрать таким, чтобы Δt равнялось четверти длины волны, то в левой части приведенных выражений мы получим поле отраженных волн для

одного из полупространств, просуммированное со своей инвертированной копией, сдвинутой на полпериода. Эта операция вносит определенные искажения в отраженный сигнал, а именно – амплитуда сигнала увеличивается по отношению к исходным значениям. Однако, это может быть учтено при обработке и интерпретации. Таким образом, мы получаем возможность разделить поля отраженных волн, приходящих из разных полупространств, с качеством, вполне достаточным как для выполнения структурных построений, так и для атрибутивного анализа.

В целях обоснования работоспособности описанного способа разделения отражений выполнены модельные расчеты для отдельных сейсмических трасс, зарегистрированных в условиях полного пространства одним и тем же сейсмоприемником, но для двух разнесенных по вертикали пунктов возбуждения [209]. Выбрана модель, соответствующая реальной геологической обстановке – пять отражающих границ в верхнем полупространстве на расстоянии 4, 10, 14, 21 и 25 м от линии приема, и одна граница в нижнем полупространстве на расстоянии 9 м от линии приема. В качестве импульса выбрана затухающая синусоида с центральной частотой 500 Гц, расстояние между линиями возбуждения – 1.25 м (четверть длины волны), скорость распространения поперечных волн – 2500 м/с.

По результатам расчета синтетических трасс можно наблюдать сдвиг отраженных сигналов за счет использования двух линий возбуждения. Так, отражения, пришедшие из верхнего полупространства, фиксируются на меньшем времени при возбуждении колебаний на верхней линии ПВ (рисунок 59, а), и на большем времени при возбуждении на нижней линии ПВ (рисунок 59, б). Для отражения, пришедшего из нижнего полупространства, наблюдается обратная картина (рисунок 59, а, б)

Моделирование подтвердило работоспособность предлагаемого способа разделения отражений, а также оптимальное расстояние между линиями возбуждения – $\frac{1}{4}$ длины волны, что согласуется с выражениями 22 и 23.

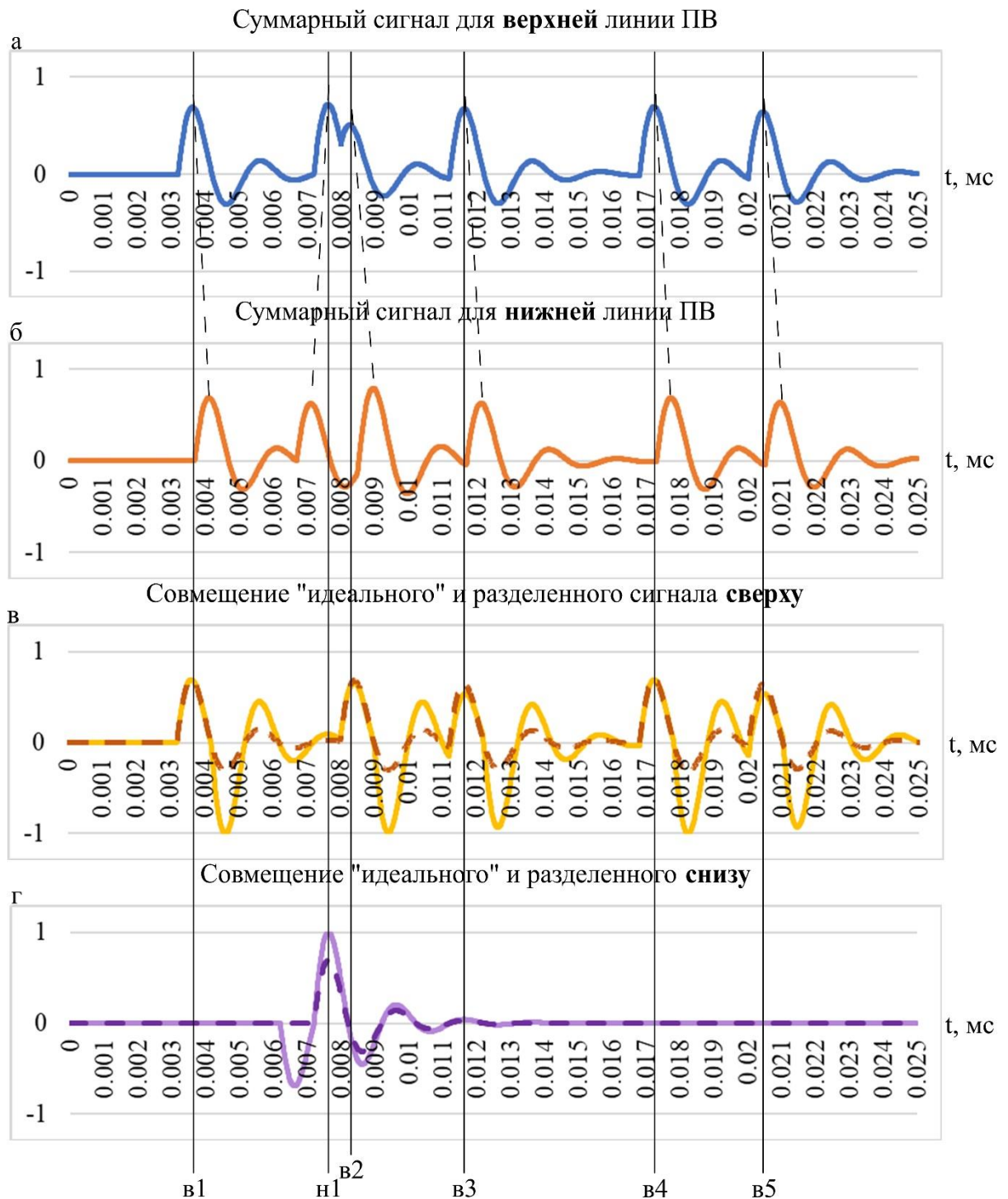


Рисунок 59 – Результаты разделения отражений, пришедших из разных полупространств: а, б – суммарный отраженный сигнал соответственно для верхних и нижних линий ПВ; в – совмещение «идеального» отраженного сигнала (пунктирная линия) и сигнала, получаемого с помощью разделения отражений (сплошная линия) для верхнего полупространства; г – то же, что и в, для нижнего полупространства, в1..в5 – отражения от вышележащих границ и их номер, н1 – отражение от нижележащей границы (по данным автора [209])

Так, при сдвиге трассы для нижней линии ПВ в сторону увеличения времени и вычитании сдвинутой трассы из трассы для верхней линии ПВ происходит полное подавление отражения из нижнего полупространства (рисунок 59, в). Повторение процедуры со сдвигом в сторону уменьшения времени приводит к подавлению отражений из верхнего полупространства (рисунок 59, г). Естественно, что в итоге подавления отражений из одного полупространства, на записях остаются отражения только из противоположного полупространства, что и требуется при разделении отражений для построения объективной модели ПТС.

2.3.2 Методика выполнения шахтных полевых работ.

Методика выполнения полевых работ для исследования ИГУ для построения геофизических моделей ПТС в условиях подземной разработки соляных месторождений включает в себя следующие базовые подразделы:

- характеристика системы наблюдений: шаг ППР и шаг ПВ, группирование;
- параметры регистрации: длина записи, шаг дискретизации, параметры фильтрации;
- характеристика источника упругих колебаний: вес, направление воздействия, количество накоплений, группирование;
- характеристика приемников: направленность, тип крепления.

Параметры системы наблюдения. Для обоснованного выбора параметров системы наблюдения, возбуждения упругих волн и регистрации полезного сигнала при выполнении сейсморазведки в условиях соляных шахт произведена оценка фонового акустического шума в шахтных условиях (рисунок 60). Шум оценивается как повсеместный, широкополосный – от единиц до сотен герц, амплитуда – в пределах 10–50 мкВ, что может быть сопоставимо с уровнем отраженного сигнала, особенно от границ на расстоянии 200–300 м от приемной линии. Поскольку спектр шума близок к спектру полезного сигнала, цифровой фильтрации может оказаться недостаточно, поэтому увеличение отношения сигнал/шум на этапе полевых работ

возможно путем накопления ударных воздействий.

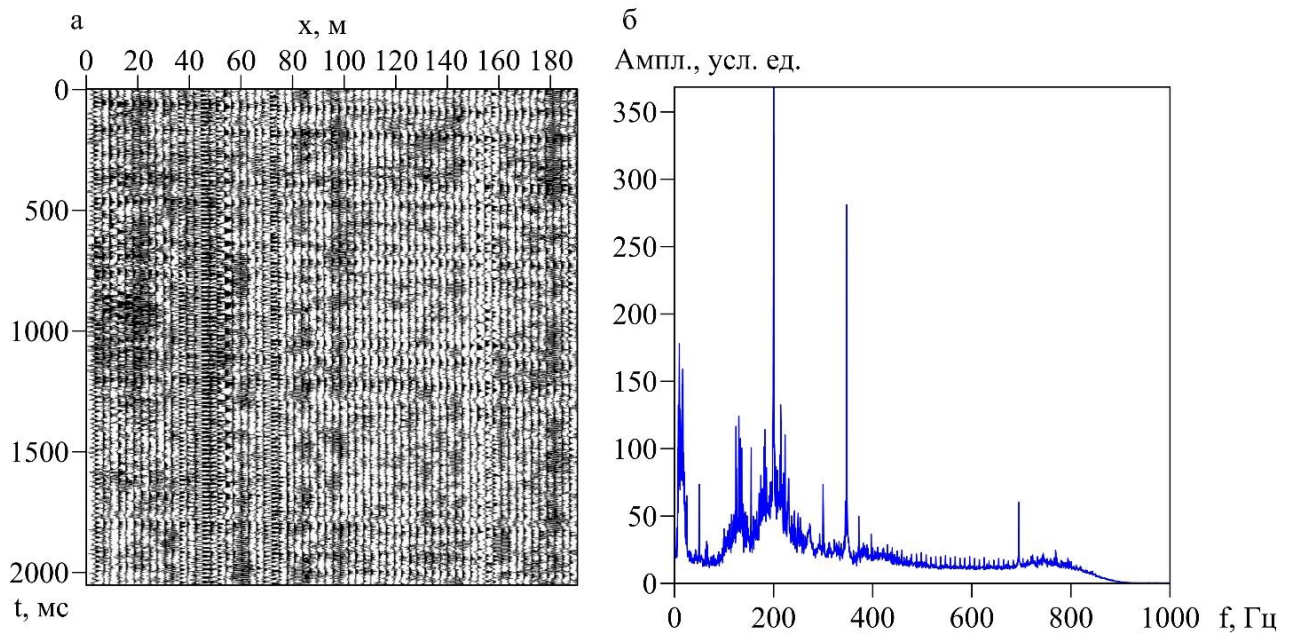


Рисунок 60 – Запись фоновых микросейсмических колебаний (шума) (а), и их спектр (б) (по данным автора [224])

Базовые параметры системы наблюдения для выполнения опытных работ рассчитаны исходя из теоретических положений МОВ МОГТ [34, 38, 236, 302], практическое же обоснование наиболее подходящих характеристик как системы наблюдений, так и остальных, указанных выше, требует выполнения опытных работ.

Диапазон параметров регистрирующей установки изначально определен следующим:

- расстояние между ППр – 1–8 м;
- расстояние между ПВ – 2–16 м;
- количество активных каналов – не менее 48, желательно 64 и более;
- шаг дискретизации – не более 0,25 мс, желательно 0,1 мс;
- длина записи – не менее 256 мс, желательно 512 мс;
- источник колебаний – кувалда весом 1–5 кг;
- количество накоплений – 1–20.

Опробование с различным количеством возбуждений (1, 5, 10, 15, 100) с кувалдой весом 1,5 кг показало, что с увеличением количества накоплений

амплитуда записи растет пропорционально, что вполне ожидаемо (рисунок 61, а, б). При этом форма спектра практически не изменяется, что подтверждается спектром записей после регулировки амплитуд (рисунок 61, в, г).

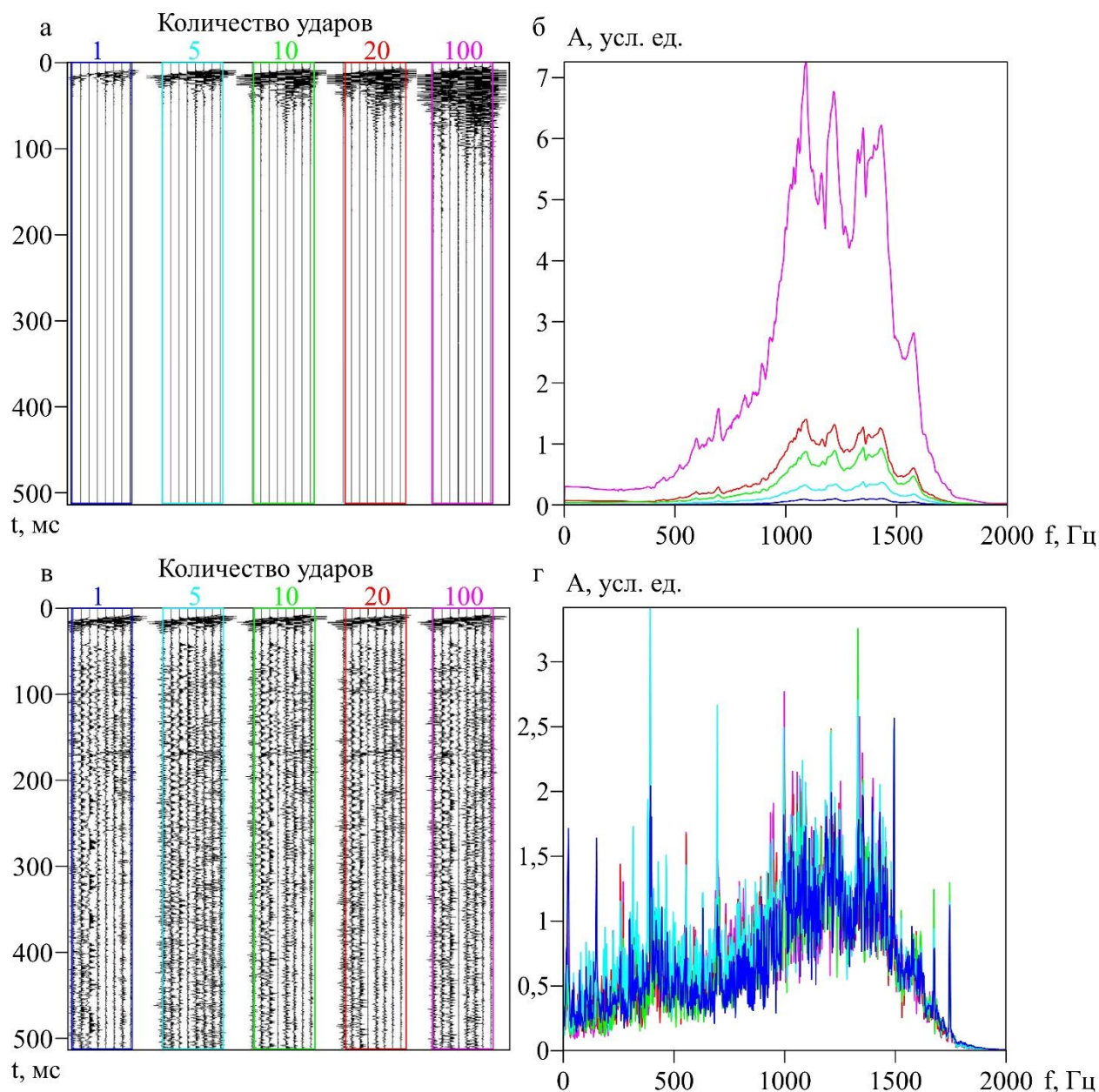


Рисунок 61 – Анализ записей с различным количеством накоплений: а – записи с различным количеством накоплений (слева направо): 1, 5, 10, 20, 100; б – амплитудные спектры записей; в – записи после амплитудной регулировки; г – амплитудные спектры записей после амплитудной регулировки (по данным автора [224])

Основными критериями для выбора числа накоплений следует считать минимально необходимую амплитуду записи, которую нужно зарегистрировать, степень увеличения отношения сигнал/шум, и время, затрачиваемое на выполнение одного ПВ. Как видно из рисунка 45, б, уже при числе накоплений равном пяти, амплитуда колебаний в десятки и сотни раз превышает амплитуду шума. Соотношение сигнал/шум увеличивается в $\sqrt{N}$ раз, где N – количество накоплений. При N равном 5, соотношение сигнал/шум должно увеличиться примерно в 2,24 раза. Таким образом, пятикратного накопления ударных воздействий будет достаточно для обеспечения кондиционности полевых материалов с точки зрения амплитуды записи и соотношения сигнал/шум, и при этом будет сохранен высокий темп выполнения полевых работ.

Шаг дискретизации определяется согласно теореме Котельникова [143], доказавшего, что шаг дискретизации непрерывного сигнала должен быть не более, чем $1/(2f)$ секунд, где f – максимальная частота в спектре сигнала, которую необходимо зарегистрировать [35]. Исходя из рисунка 42, б, $f=1700$ Гц, то есть шаг дискретизации должен быть не более 0.294 мс. Эта же информация позволяет определить и параметры входного фильтра – полоса пропускания его должна быть от 0 до 1700 Гц, что позволит избежать возможного аляйсинга, или наложения помех из высокочастотной области спектра на целевой диапазон частот.

Длина записи определяется расстоянием до наиболее удаленных геологических границ, отражение от которых необходимо зарегистрировать, и средней скоростью до них. В условиях ВКМС наиболее удаленными границами, отражения от которых подлежат регистрации, являются СЗ в верхнем полупространстве и кНПП в нижнем полупространстве. Расстояние от линии наблюдения до СЗ не превышает 150 м, до кНПП – 400 м. Исходя из скорости поперечных волн, равной 2500 м/с, длина записи для гарантированной регистрации отражения от СЗ должна быть не менее 0.120 с, а от кНПП – не менее 0.320 с.

Перебор различного шага ППр дал следующие результаты. Разрезы с шагом ППр, равным *один и два метра* практически не отличаются друг от друга (рисунок 62, рисунок 63 соответственно). Дальнейшее увеличение шага ППр до *четырёх метров* приводит к исчезновению либо сглаживанию ряда деталей, особенно на

отражениях от складчатых границ (рисунок 64), местами отражения вообще исчезают.

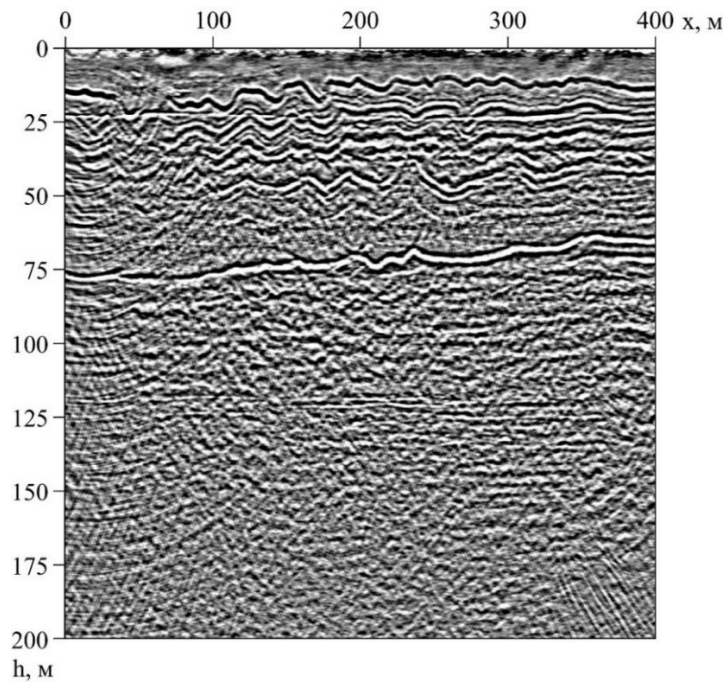


Рисунок 62 – Глубинный разрез, полученный с шагом ППр, равным 1 м (при шаге ПВ = 2 м) (по данным автора [224])

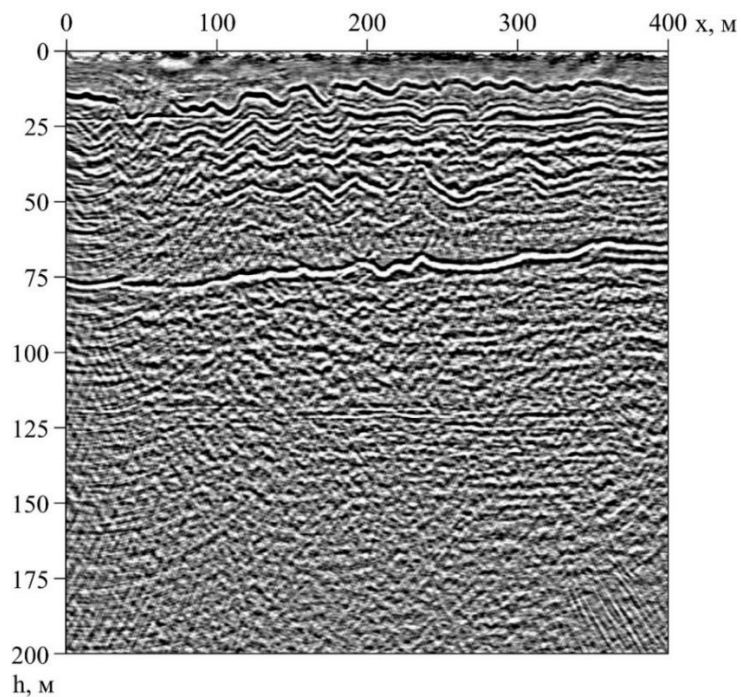


Рисунок 63 – Глубинный разрез, полученный с шагом ППр, равным 2 м (при шаге ПВ = 2 м) (по данным автора [224])

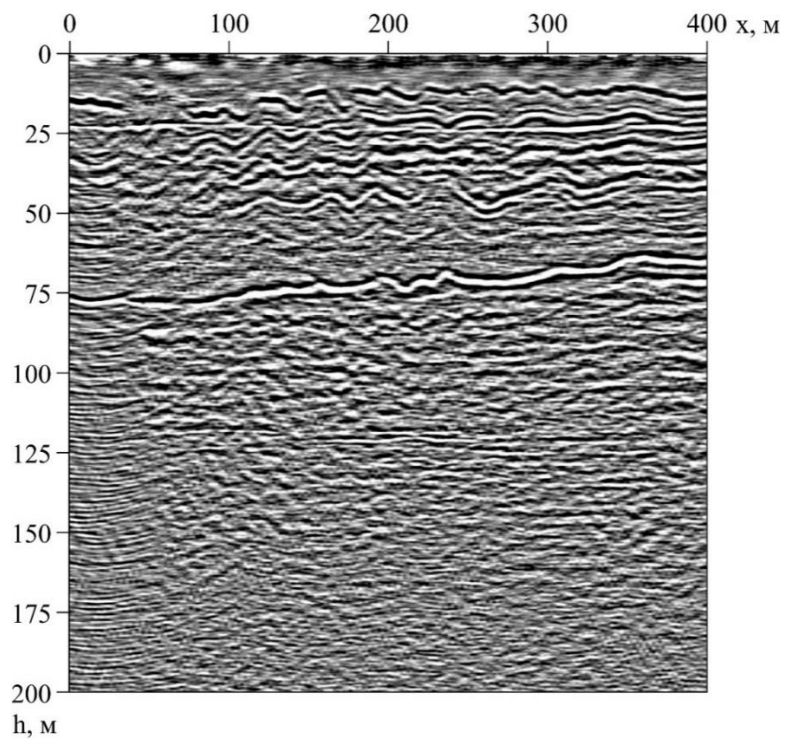


Рисунок 64 – Глубинный разрез, полученный с шагом ППр, равным 4 м (при шаге ПВ = 2 м) (по данным автора [224])

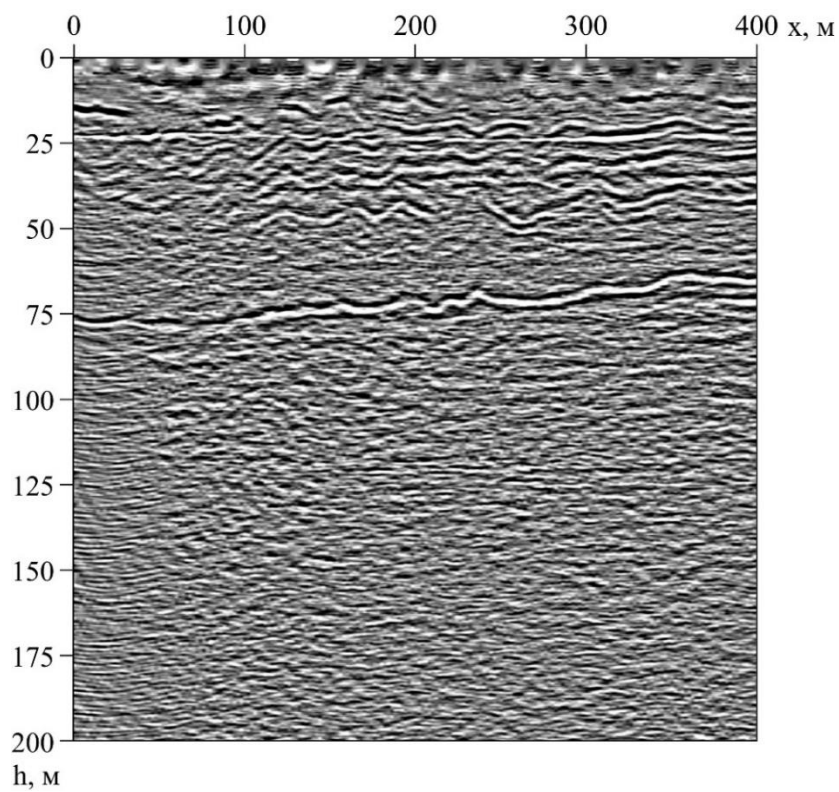


Рисунок 65 – Глубинный разрез, полученный с шагом ППр, равным 8 м (при шаге ПВ = 2 м) (по данным автора [224])

Увеличение шага ПП_р до восьми метров искажают волновую картину уже критично, отражения от складчатых границ полностью «рассыпаются», остаются только отражения от линейных субгоризонтальных участков отражающих границ (рисунок 65).

Перебор различного шага ПВ дал следующие результаты. Разрезы с шагом ПВ, равным 2 и 4 м практически не отличаются друг от друга (рисунок 66 и рисунок 67 соответственно). Дальнейшее увеличение шага ПВ до 8 м приводит к исчезновению либо сглаживанию ряда деталей, особенно на отражениях от складчатых границ (рисунок 68), местами отражения вообще исчезают. Увеличение шага ПВ до 16 м портят картину уже совсем критично, отражения от складчатых границ полностью «рассыпаются», остаются только отражения от линейных субгоризонтальных участков отражающих границ (рисунок 69).

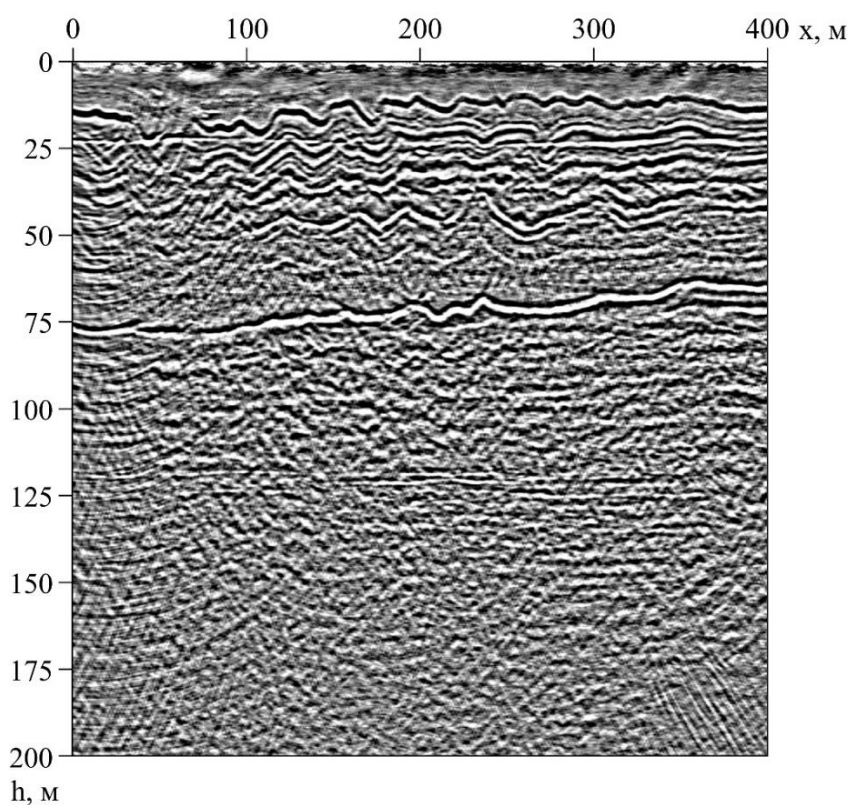


Рисунок 66 – Глубинный разрез, полученный с шагом ПВ, равным 2 м (при шаге ПП_р = 2 м) (по данным автора [224])

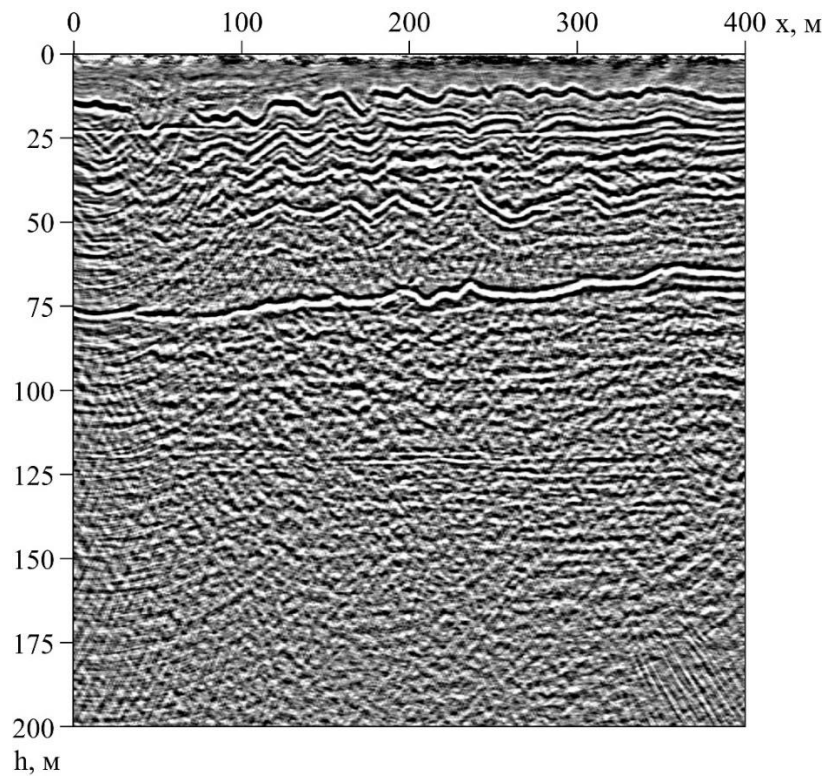


Рисунок 67 – Глубинный разрез, полученный с шагом ПВ, равным 4 м (при шаге ППр = 2 м) (по данным автора [224])

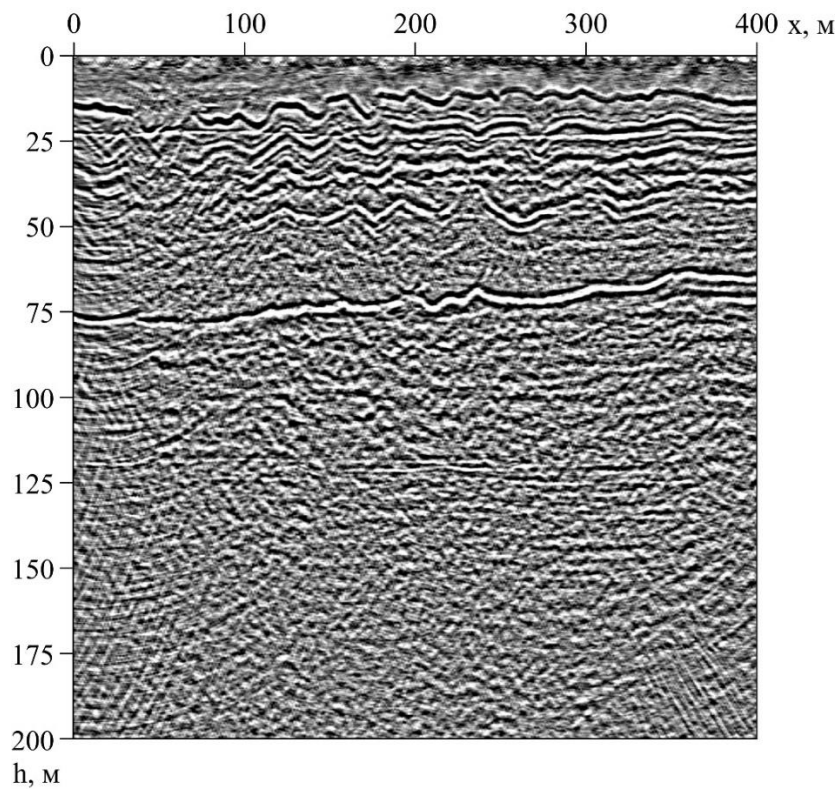


Рисунок 68 – Глубинный разрез, полученный с шагом ПВ, равным 8 м (при шаге ППр = 2 м) (по данным автора [224])

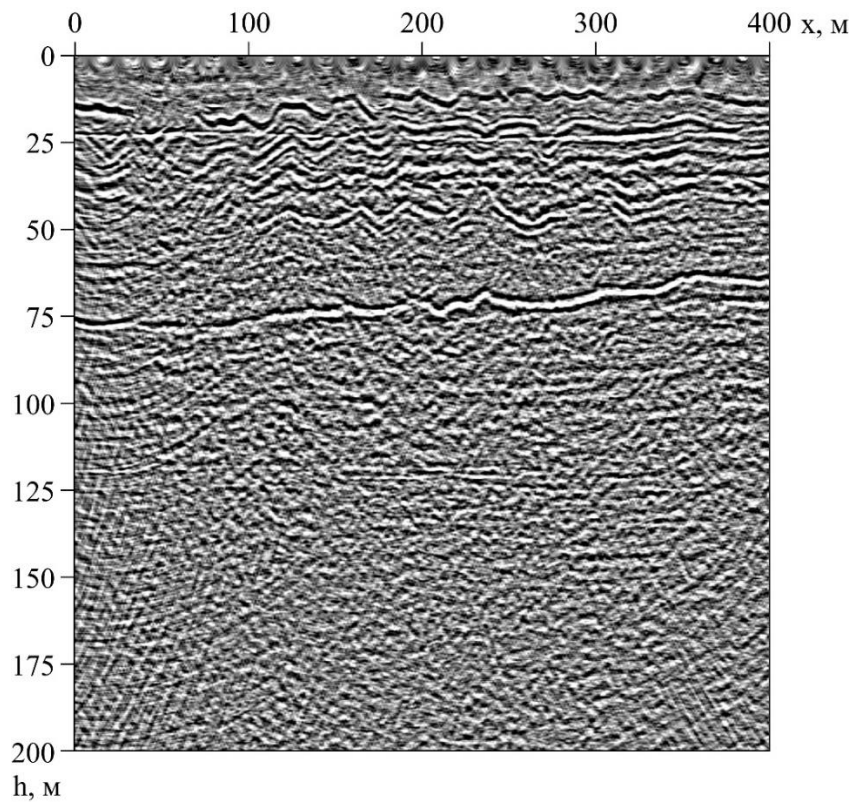


Рисунок 69 – Глубинный разрез, полученный с шагом ПВ, равным 16 м (при шаге ПП_р = 2 м) (по данным автора [224])

Перебор различного количества каналов в расстановке дал следующие результаты. Разрезы с количеством каналов 96 и 64 практически не отличаются друг от друга (рисунок 70 и рисунок 71 соответственно). Дальнейшее уменьшение количества каналов до 48 приводит к исчезновению либо сглаживанию ряда деталей, особенно на отражениях от складчатых границ (рисунок 72), местами отражения вообще исчезают. Уменьшение числа каналов до 24 искажает картину критично, отражения от складчатых границ полностью «рассыпаются», остаются только отражения от линейных субгоризонтальных участков отражающих границ (рисунок 73).

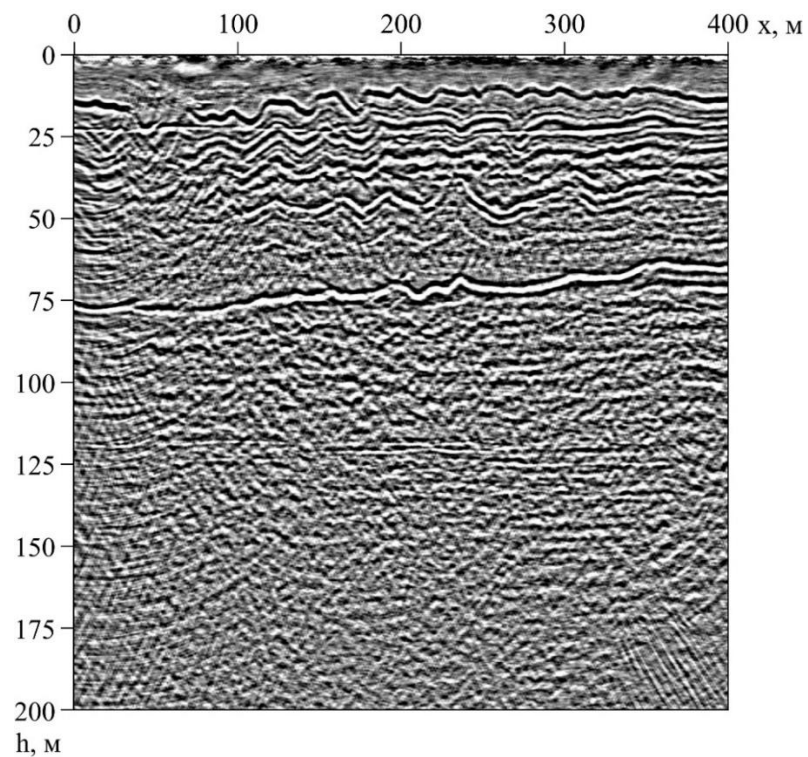


Рисунок 70 – Глубинный разрез, полученный с 96–канальной расстановкой (при шаге ППр = ПВ = 2 м) (по данным автора [224])

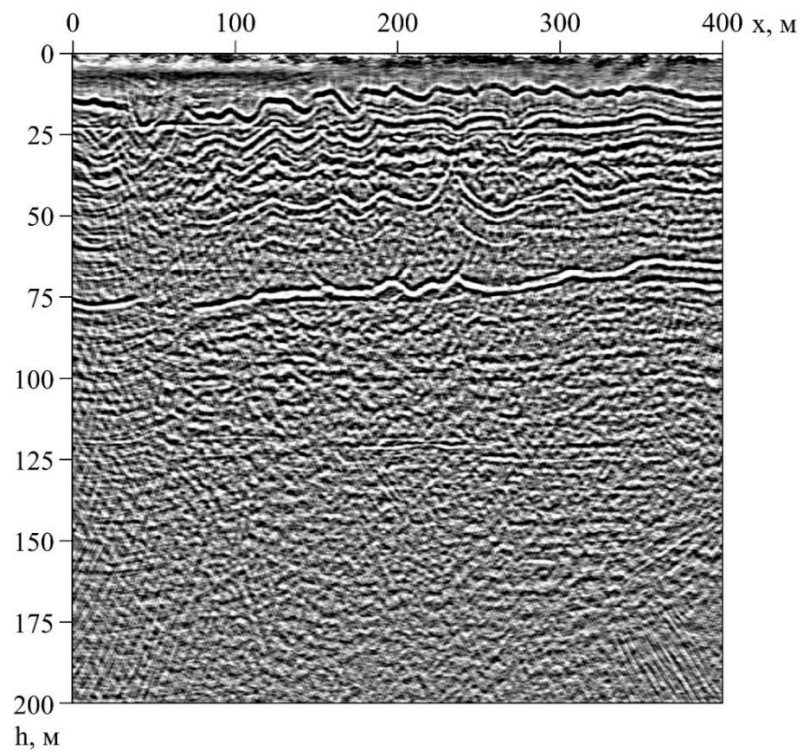


Рисунок 71 – Глубинный разрез, полученный с 64–канальной расстановкой (при шаге ППр = ПВ = 2 м) (по данным автора [224])

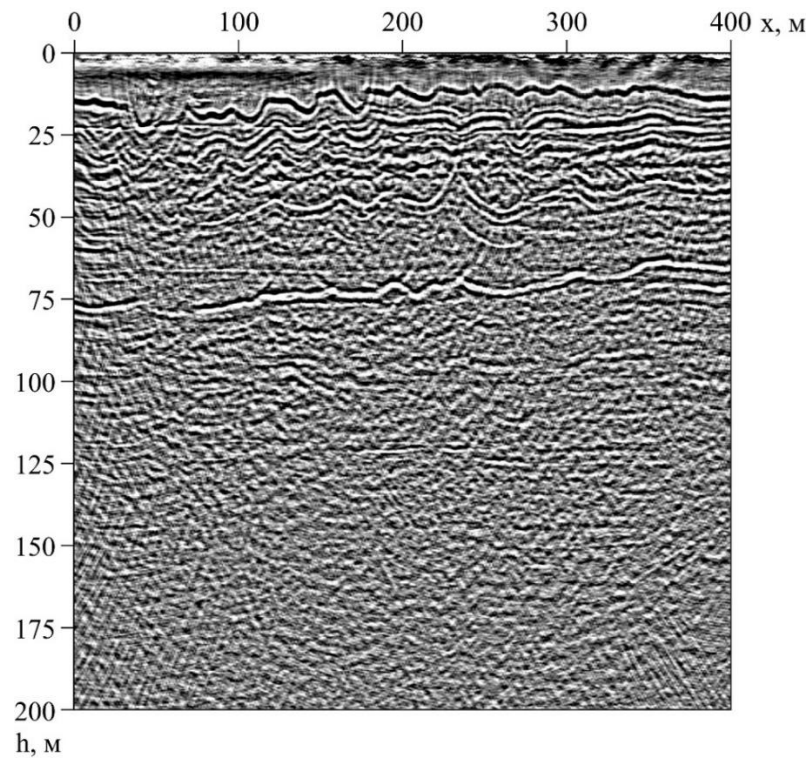


Рисунок 72 – Глубинный разрез, полученный с 48-канальной расстановкой (при шаге ППр = ПВ = 2 м) (по данным автора [224])

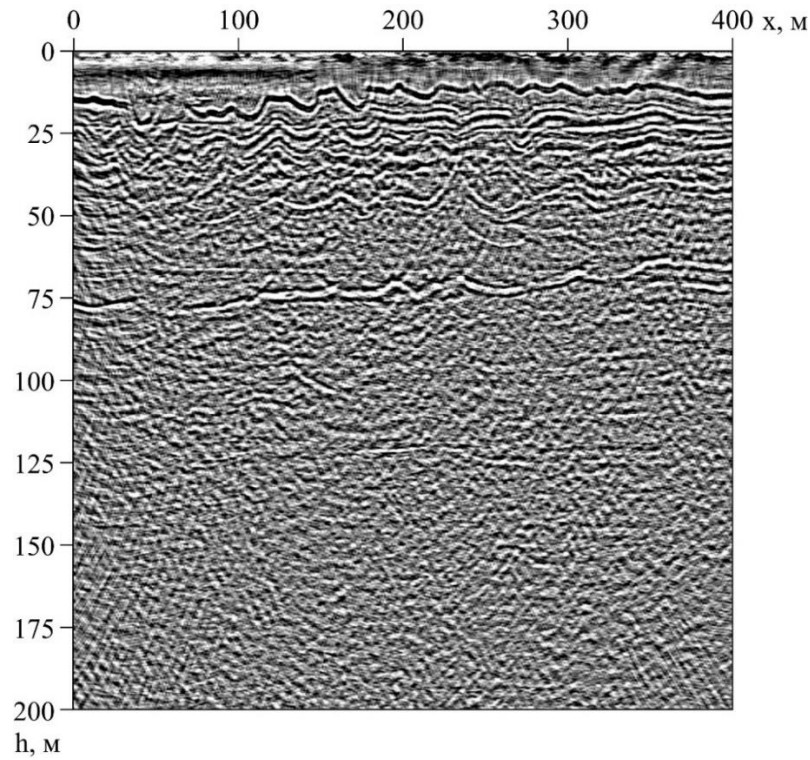


Рисунок 73 – Глубинный разрез, полученный с 24-канальной расстановкой (при шаге ППр = ПВ = 2 м) (по данным автора [224])

Таким образом, подытоживая результаты опытных исследований по выбору параметров возбуждения и регистрации упругих волн при выполнении шахтных полевых сейсморазведочных работ для исследования ИГУ и построения геофизических моделей ПТС в условиях подземной разработки соляных месторождений рекомендуются *следующие параметры*, позволяющие получить кондиционные результаты при минимально возможных трудовых, временных и аппаратных ресурсах:

- расстояние между ППр – 2 м;
- расстояние между ПВ – 4 м;
- количество активных каналов – 64;
- длина записи – не менее 320 мс;
- шаг дискретизации – не более 0.25 мс;
- источник колебаний – кувалда весом 1,5 кг;
- количество накоплений – 5.

Для улучшения результатов, особенно в случае интенсивной складчатости и наклонных геологических границ, рекомендуется удлинить расстановку до 96 и более каналов, уменьшить шаг ПВ до 2 м, и уменьшить шаг дискретизации до 0.1–0.125 мс. Данное решение даст возможность регистрировать отражения в бóльшем диапазоне углов складчатости, повысить кратность и расширить спектр записей, что позволит получать более информативные волновые образы складчатых областей, но при одновременном увеличении трудоемкости полевых работ и повышении требований к аппаратуре.

Исходя из изложенной информации, при исследованиях соляных месторождений рекомендуется использовать разработанную авторами методику выполнения шахтных полевых работ, изложенную в патенте [191] (рисунок 58).

Для изучения геологического строения и построения геофизических моделей ПТС в условиях подземной разработки соляных месторождений шахтная сейсморазведка осуществляется на S-волнах. Сейсмоприемники для зондирования устанавливаются, в зависимости от плоскости наблюдений, в отверстия,

просверленные в стенке, подошве либо кровле горной выработки. Сейсмоприемники выбираются следующим образом:

- горизонтально-направленные для зондирования в вертикальной плоскости (вверх и вниз относительно горной выработки) (рисунок 58, а);
- вертикально-направленные для зондирования в горизонтальной плоскости (рис. 43, б);
- всенаправленные или трехкомпонентные для зондирования в наклонной плоскости, например, под углом 45^0 к горизонту (рисунок 58, в).

Возбуждение S-волн выполняется горизонтально-направленными ударами вдоль линии возбуждения в стенку выработки для зондирования в вертикальной плоскости (рис. 43, а), вертикально-направленными ударами в подошву или кровлю выработки для зондирования в горизонтальной плоскости (рисунок 58, б) и наклонными ударами для зондирования в плоскости, отличной от горизонтальной и вертикальной, например, под углом 45^0 к горизонту (рисунок 58, в). Поперечные волны при этом распространяются в направлении, радиальном относительно оси ударов, а отраженные поперечные волны будут приходить к линии приема с двух сторон. В результате будет регистрироваться интерференционная картина, содержащая информацию о геологическом строении массива сразу с двух сторон относительно горной выработки.

Для регистрации и разделения поперечных волн, приходящих к линии приема с разных сторон, используется методика, описанная в разделе 4.1, и состоящая из двух этапов – полевого и камерального.

На полевом этапе возбуждение поперечных волн выполняется, в зависимости от направления зондирования, ударами в стенку 3, подошву 4 или кровлю 5 выработки по двум линиям возбуждения 11, разнесенным друг от друга на некоторое расстояние в плоскости, перпендикулярной ориентации сейсмоприемников (рисунок 58). Такой подход даст разницу прихода поперечных волн с разных сторон во времени порядка 1-2 мс, в зависимости от геологических условий, чего вполне достаточно для определения направления прихода упругой волны. Дальнейшее разделение выполняется на камеральном этапе.

Для повышения эффективности выполнения полевых работ разработана специальная программа EJ [223, 243, 247]. Функции и цели программы:

- увеличение скорости выполнения полевых работ;
- ведение электронного полевого журнала;
- учет нескольких линий возбуждения;
- формирование геометрии для дальнейшей обработки;
- снижение ошибок при ведении полевой документации;
- автоматизированное получение предварительных сейсмогеологических разрезов, в том числе разделение волновых полей, приходящих из разных полупространств.

Характерные особенности материалов, получаемых шахтной сейсморазведкой методом ПВРО, главным образом определяются условиями, в которых он применяется:

- отсутствие зоны малых скоростей;
- условия полного пространства;
- наличие внутрисоляных деформаций (ВСД), представленных складчатостью разного порядка;
- очень хорошие и выдержанные вдоль профиля условия возбуждения и приема колебаний;
- наличие интенсивных как природных, так и техногенных помех, вызванных работой множества механизмов, и распространяющихся на многие сотни метров в плотном массиве солей.

В результате, записи шахтной сейсморазведки ПВРО, по сравнению с поверхностной сейсморазведкой, отличаются следующими характеристиками:

- отсутствием поверхностных волн;
- наличием интенсивного высокочастотного шума во всем диапазоне регистрируемых частот;
- широким спектром сигнала – от единиц до 1000-2000 Гц;
- интерференцией отражений, приходящих к приемной линии из разных полупространств и от сопряжений выработок;

- наличием большого количества годографов дифрагированных волн, образующихся на сопряжениях с другими выработками;
- наличием большого количества искажений на годографах, связанных с ВСД – петли на годографах от синклинальных складок, смещение годографов от наклонных отражающих границ, растянутые годографы на антиклинальных складках;
- наличием двух наборов данных, относящихся к разным линиям ПВ.

К отличиям получаемых материалов от результатов предыдущих шахтных исследований необходимо отнести устойчивость и прослеживаемость осей синфазности, детальное отображение структурных особенностей геологического строения, что объясняется использованием поперечных волн в качестве целевых.

2.3.3 Методика обработки данных

В ходе исследовательских работ по обработке сейсморазведочных материалов, получаемых в подземных условиях, разработан базовый граф цифровой обработки [38], основанный на принципах обработки данных МОВ МОГТ. В общем виде он представляет из себя следующую последовательность процедур:

- загрузка в обрабатывающий комплекс;
- присвоение геометрии;
- амплитудная коррекция;
- полосовая фильтрация;
- разделение отражений;
- ввод кинематических поправок;
- суммирование сейсмограмм ОГТ;
- миграция временного разреза;
- преобразование из временного масштаба в глубинный;
- F-K фильтрация (при необходимости) для устранения дифракций от сопряженных выработок;
- ввод поправок за рельеф выработки;

– сшивка разрезов верхнего и нижнего полупространств в единый разрез.

В разработанном графе нет процедуры ввода статических поправок, что связано с отсутствием зоны малых скоростей, характерной для поверхностной сейморазведки [291], а также используется процедура разделения отражений, приходящих из разных полупространств, не используемая ранее в обработке профильных сейсмических данных [206].

Рассмотрим подробнее примеры применения описанных процедур для случая оптимальных параметров, подобранных в ходе настоящих исследований.

Предварительная обработка сейсмограмм. Амплитудная коррекция выполняется с помощью процедуры автоматической коррекции в окне порядка 10–20 мс. В случае, когда необходимо сохранение относительных значений амплитуд (для атрибутивного анализа или инверсии), выполняется только коррекция амплитуд за сферическое расхождение и поглощение.

Полосовая фильтрация выполняется в диапазоне 100–1200 Гц. Выбор нижней границы фильтра обусловлен значительным уровнем техногенных помех в диапазоне от единиц до 100 Гц. Таким образом, в ходе полосовой фильтрации удастся отсеять большинство высокоамплитудных низкочастотных помех, включая промышленную частоту 50 Гц, не сильно жертвуя шириной спектра сигнала. Ограничение спектра сверху частотой 1200 Гц, в свою очередь, позволяет подавить очень интенсивную высокочастотную шумовую компоненту, широко представленную в шахтных условиях благодаря отсутствию верхней части разреза и работе горнодобывающей техники (рисунки 32, 33).

Последовательное применение к исходным данным процедур амплитудной регулировки и полосовой фильтрации улучшает запись настолько, что невооруженным глазом становятся видны отражения от геологических границ (рисунок 74, в). Обработка сейсмограмм для нижней и верхней линий возбуждения выполняется по одинаковым графам, что в дальнейшем обеспечивает наилучший результат при разделении отражений, пришедших из разных полупространств.

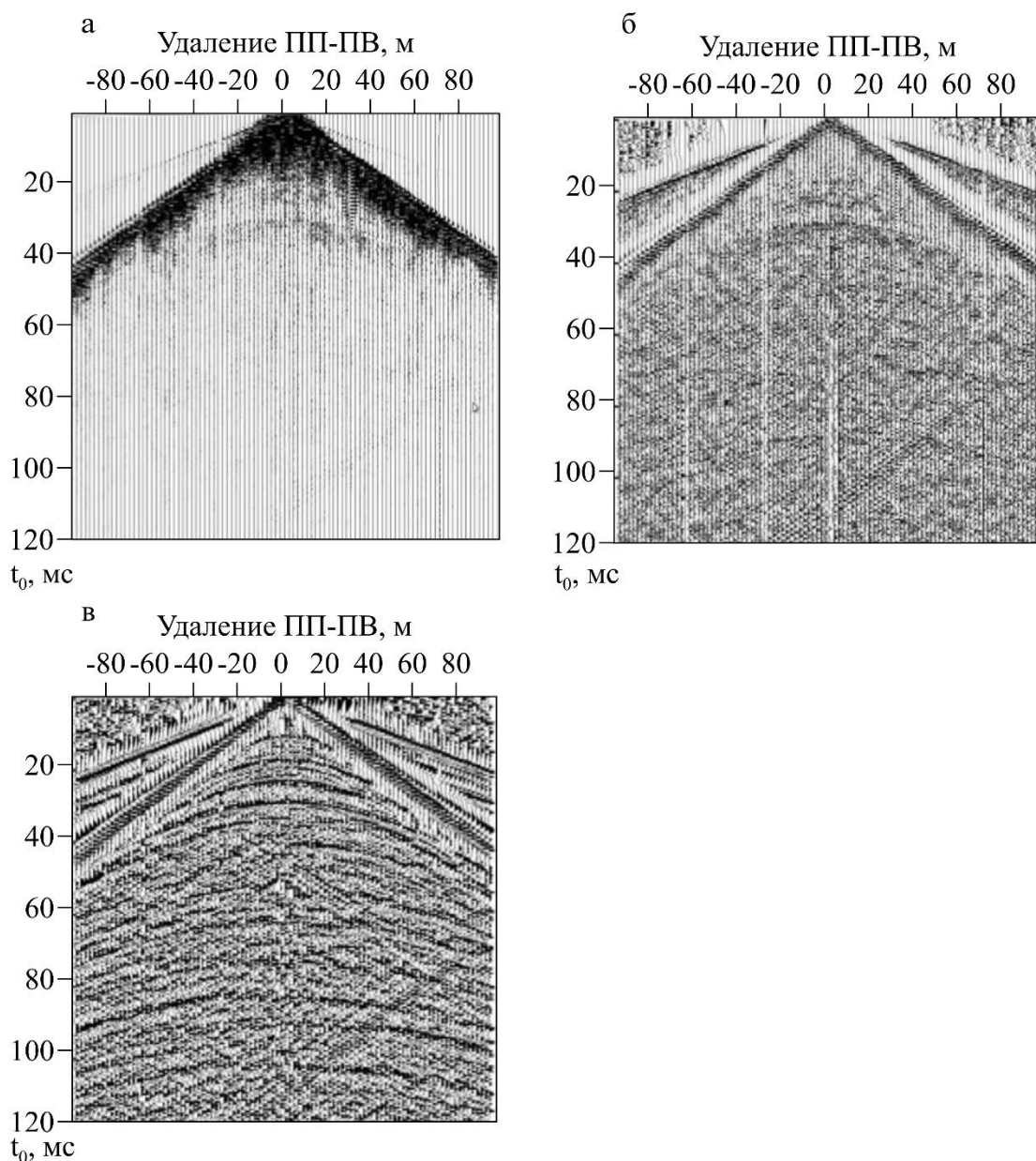


Рисунок 74 – Пример сейсмограмм: а – полевая; б – после регулировки амплитуд; в – после регулировки амплитуд и полосовой фильтрации (по данным автора [206])

Разделение отражений, приходящих из разных полупространств.

Разделение отражений происходит путем вычитания друг из друга двух массивов данных, полученных по разным линиям ПВ, предварительно сдвинутых с учетом расстояния между этими линиями. Сдвиг выполняется с помощью процедуры введения статических поправок, имеющейся в любом пакете обработки. Значения поправок определяются расстоянием между линиями ПВ, выбранным при выполнении полевых работ [206], и обычно составляют порядка 0.75 м (0.6 мс).

Возможны 2 варианта разделения: путем вычитания сейсмограмм и путем вычитания разрезов ОГТ.

В первом подходе исходные сейсмограммы для верхних (рисунок 75, а) или нижних (рисунок 75, б) линий пунктов возбуждения сдвигаются, как описано в [191, 206], после чего потрассно вычитаются друг из друга. Сдвиг, совмещающий отражения, пришедшие снизу, приводит в результате вычитания к получению сейсмограмм, содержащих отражения из верхнего полупространства (рисунок 75, в). Сдвиг, совмещающий отражения, пришедшие сверху, приводит к получению сейсмограмм, содержащих отражения из нижнего (рисунок 75, г) полупространств. Во втором подходе операция выполняется аналогично, но применяется ко временным или глубинным разрезам. Исследования говорят о том, что разделение путем вычитания сейсмограмм дает заметно лучший результат, чем разделение путем вычитания разрезов.

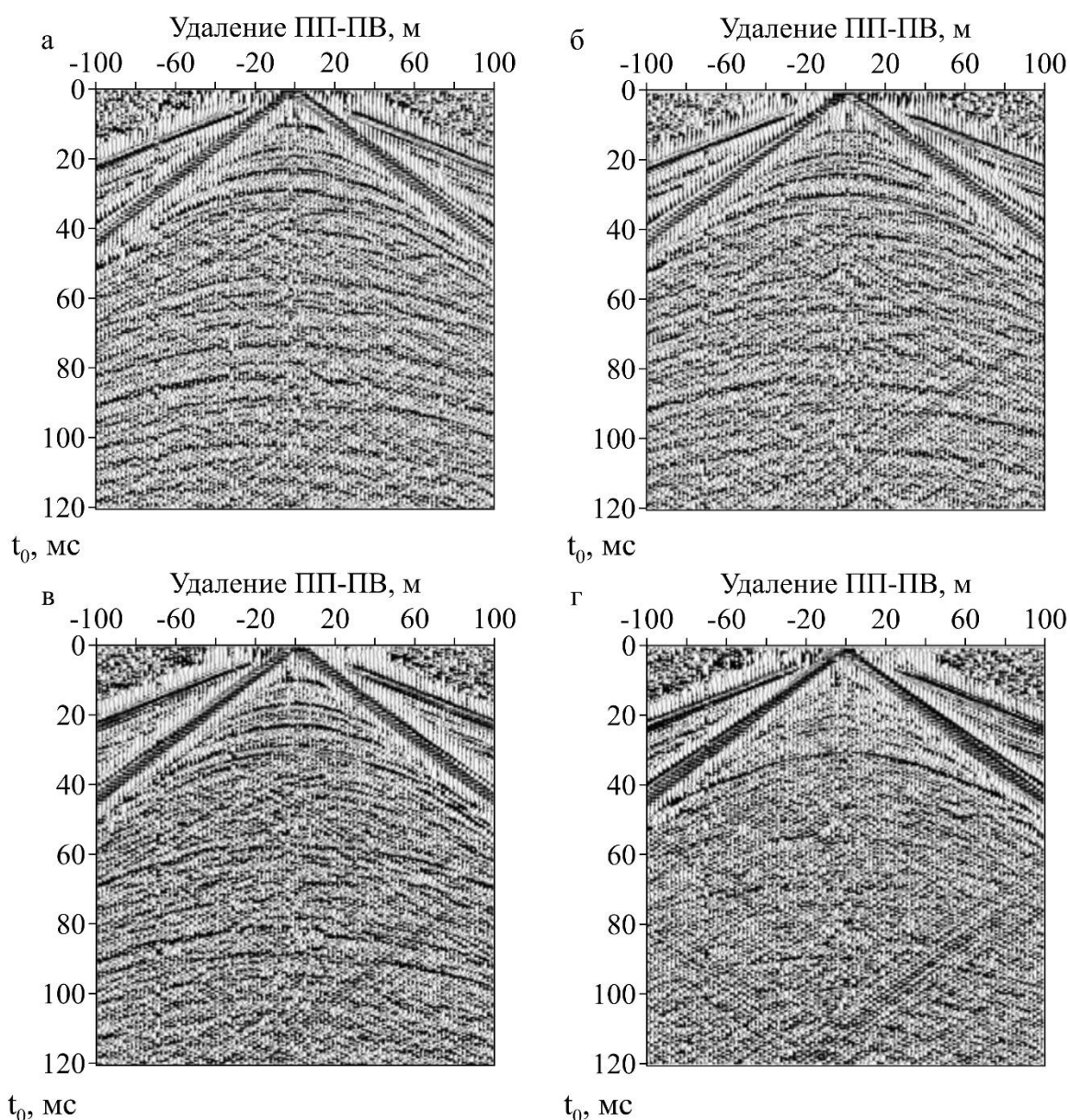


Рисунок 75 – Пример сейсмограмм до и после разделения волновых полей: а – для верхней линии пунктов возбуждения; б – для нижней линии пунктов возбуждения; в – для верхнего полупространства; г – для нижнего полупространства (применены амплитудная регуляция, полосовая фильтрация) (по данным автора [206])

Эффект процедуры разделения нагляднее всего можно продемонстрировать на суммарных разрезах, поскольку на них в явном виде проявляется геологическое строение изучаемого участка. Ниже представлены два разреза, полученных для верхних и нижних ПВ, то есть еще *до разделения* (рисунок 76, а, б). В целом разрезы практически идентичны, за исключением малозаметных деталей, связанных с

различными условиями огибания выработки упругой волной при возбуждении на верхней и нижней линиях ПВ.

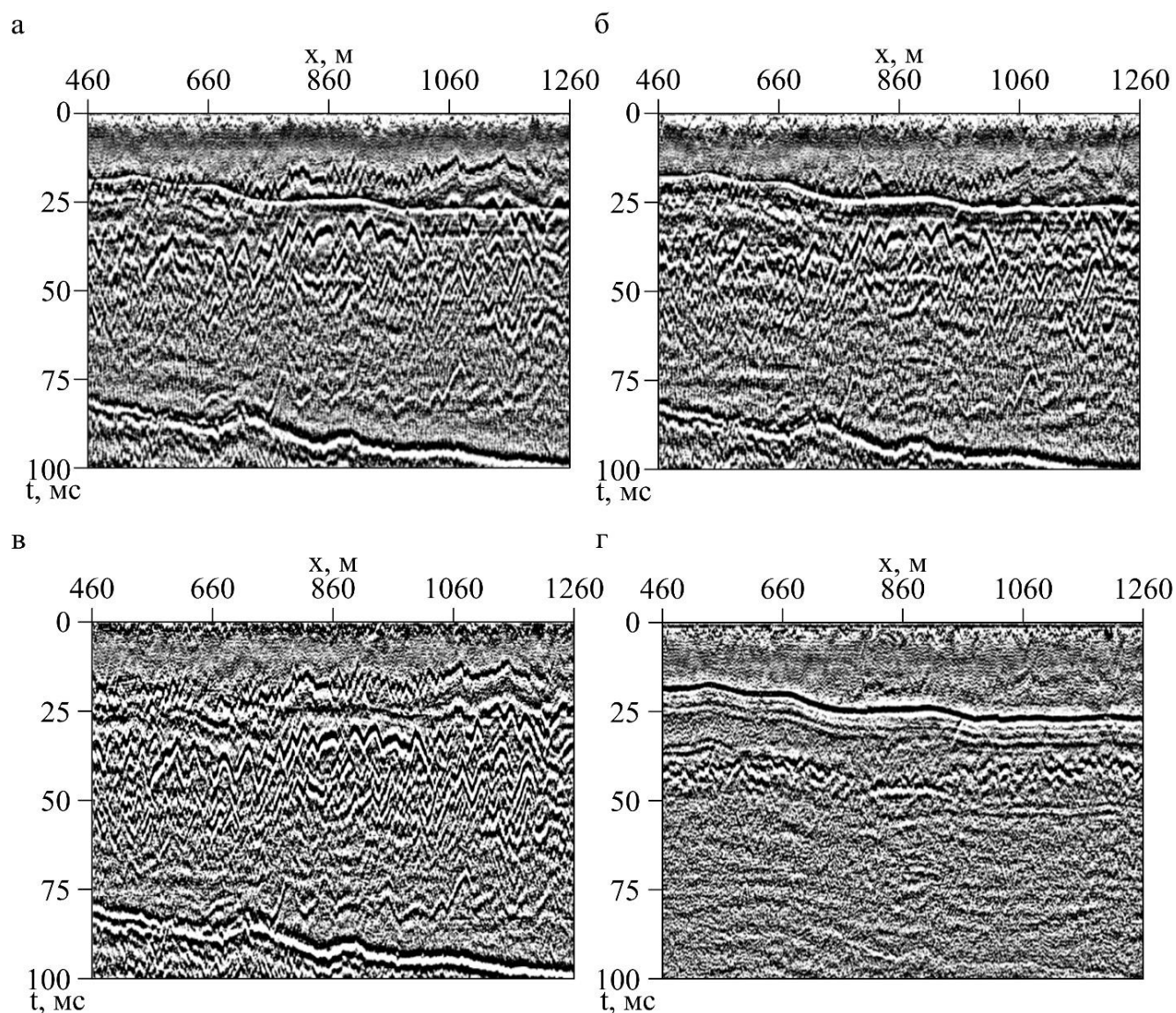


Рисунок 76 – Пример временных разрезов *до* разделения волновых полей: а – для верхней линии пунктов возбуждения; б – для нижней линии пунктов возбуждения, и *после* разделения волновых полей: в – для верхнего полупространства; г – для нижнего полупространства (по данным автора [206])

Совершенно другая ситуация наблюдается после разделения (рисунок 76, в, г). Так, разрез для верхнего полупространства содержит значительное количество осей синфазности, соответствующих складчатым геологическим границам в карналлитовой зоне и относительно выдержанному соляному зеркалу (рисунок 76, в). При этом на разрезе для нижнего полупространства отчетливо проявляются

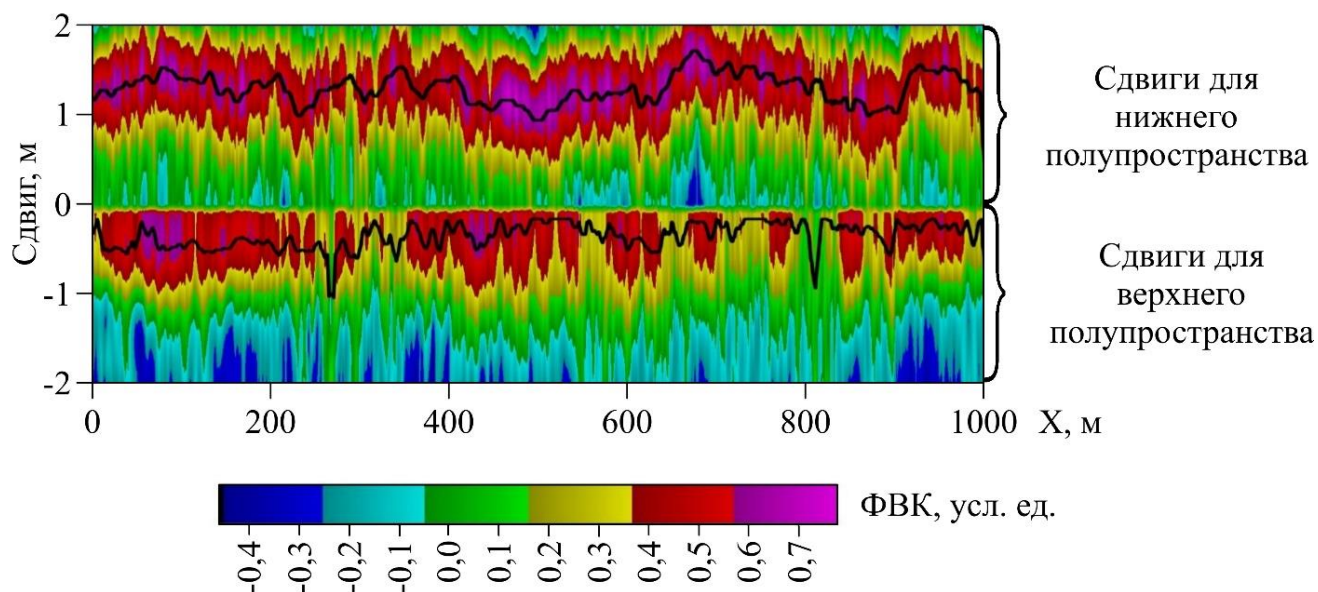
только две оси синфазности, одна из которых, наиболее ярко выраженная, соответствует выработке, пройденной в ПдКС, а вторая, плохо выдержанная, ассоциируется с пластом МГ, тонким и складчатым.

Принимая во внимание значительную разницу между разрезами для верхнего и нижнего полупространств (рисунок 76, в, г), и учитывая, что исходные записи для верхней и нижней линий ПВ визуальнo практически идентичны (рисунок 76, а, б), качество разделения волновых полей можно считать вполне удовлетворительным. При этом, на временных разрезах после разделения остаются небольшие артефакты, представляющие собой «зеркальные» отражения из другого полупространства (рисунок 76, в, г). Данное явление связано с тем, что с удалением от выработки сигнал теряет, в первую очередь, высокочастотную часть спектра, неравномерно удлиняется, поэтому вычитание выполняется не идеально. Однако, даже несмотря на описанный эффект, установить из какого полупространства пришло отражение не составляет труда благодаря значительной разнице в амплитуде и прослеживаемости истинного отражения и «артефактного».

Автоматизированный расчет поправок для сдвига. Величину сдвига для разделения волновых полей, одну для всего профиля, можно вычислить вручную исходя из данных о расстоянии между линиями ПВ и о скорости распространения упругих волн. Однако, на практике этот сдвиг не является постоянным по всему профилю. Причиной служат сложные условия выполнения полевых работ, при которых линии ПВ могут смещаться от планового положения из-за разного количества штыба, или других причин. В результате, вычитание может выполняться не настолько хорошо, как могло бы. Для точного расчета поправок разработана программа Shifts [242], в основе которой лежит вычисление функции взаимной корреляции (ФВК) между данными для верхних и нижних линий ПВ. Сдвиги, на которых отмечаются максимумы ФВК, принимаются за поправки, которые нужно ввести перед вычитанием. Образец результата работы описанной программы для случая глубинных разрезов приведен ниже (рисунок 77).

По результатам работы программы видно, что поправки для сдвигов изменяются в довольно значительных пределах, что указывает на полезность

использования данного инструмента для улучшения результата при разделении отражений. В ином случае разделение отражений будет выполняться качественно лишь на тех участках, где поправки, определенные по ФВК окажутся близкими к определенным теоретически, исходя из положения линий ППр и ПВ.



— максимум ФВК, по которому определяется поправка для сдвига

Рисунок 77 – Определение сдвигов для разделения полей на основе ФВК (по данным автора [223, 224])

Окончательная обработка, получение разрезов. Ввод кинематических поправок выполняется согласно скоростному закону, полученному по суперсейсмограммам общей глубинной точки (ОГТ) общепринятым способом. Можно отметить, что качество получаемых записей достаточно высоко, чтобы на суперсейсмограммах выделять годографы отраженных волн и определять по ним скорость суммирования $V_{огт}$ (рисунок 78).

На этапе ввода кинематических поправок выполняется автоматический мьютинг сейсмограмм, идея которого основана на отсечении частей записи, подвергшихся при введении поправок искажениям свыше указанных обработчиком. Опытным путем установлен данный процент, выше которого выполняется обнуление, колеблется в пределах 20–40 %. Данный подход позволяет уйти от необходимости использовать классический верхний мьютинг ввиду

большой скорости распространения упругих колебаний, и устойчивой формы первых вступлений в условиях соляных шахт.

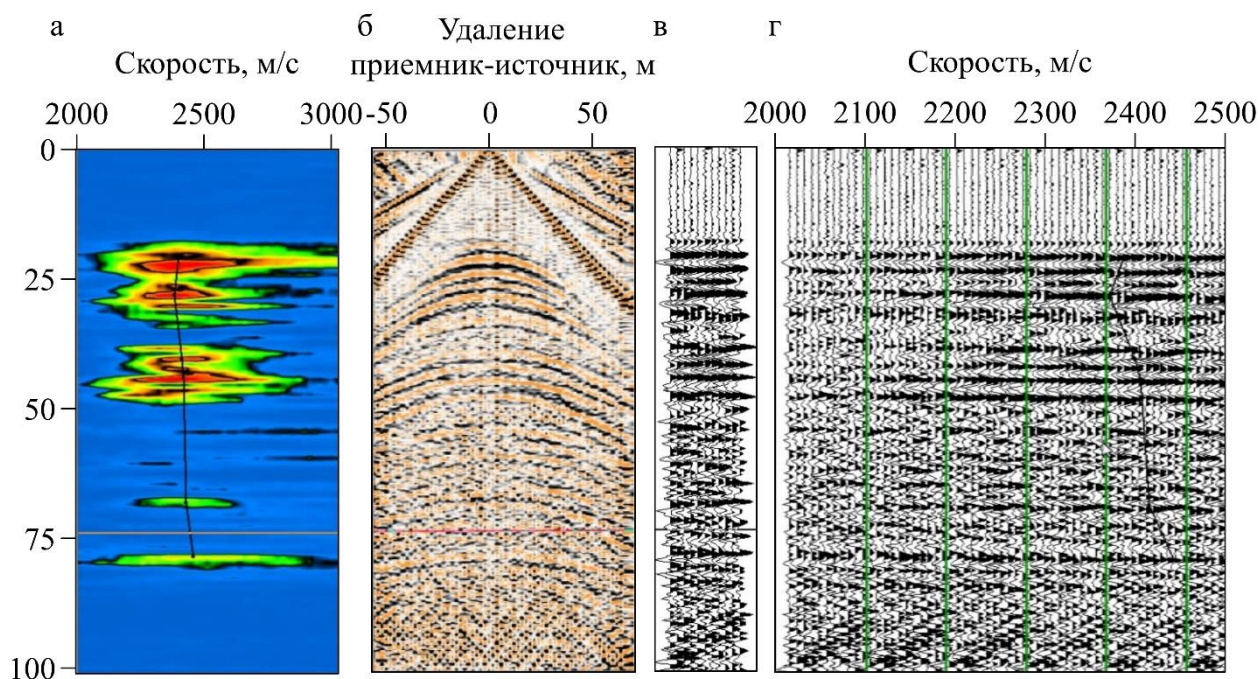


Рисунок 78 – Пример скоростного анализа для сейсмограмм, содержащих отражения преимущественно из верхнего полупространства, окна: а – спектра скоростей; б – просмотра сейсмограммы; в – суммотрасс; г – сумм с постоянными скоростями (по данным автора [206, 224])

После процедуры ввода кинематических поправок выполняется сортировка данных по ОГТ и суммирование, в результате чего получают два первичных временных разреза, содержащих отражения преимущественно из верхнего (рисунок 79, а) и нижнего (рисунок 79, б) полупространств. Из-за большого количества дифрагированных волн от ВСД и наличия в изучаемом геологическом разрезе наклонных границ (рисунок 79, а, б), необходим учет сейсмического сноса путем применения процедуры миграции.

Опытным путем выбрана миграция в Т-К области, которая обеспечивает высокое качество миграционного преобразования благодаря слабым латеральным изменениям скоростей при высокой скорости реализации процедуры. Миграция значительно улучшает разрезы ОГТ, получаемые в рамках метода ПВРО,

исправляя положение наклонных границ и восстанавливая форму складок (рисунок 79, в, г), для ее практической реализации разработана программа MSDM [250].

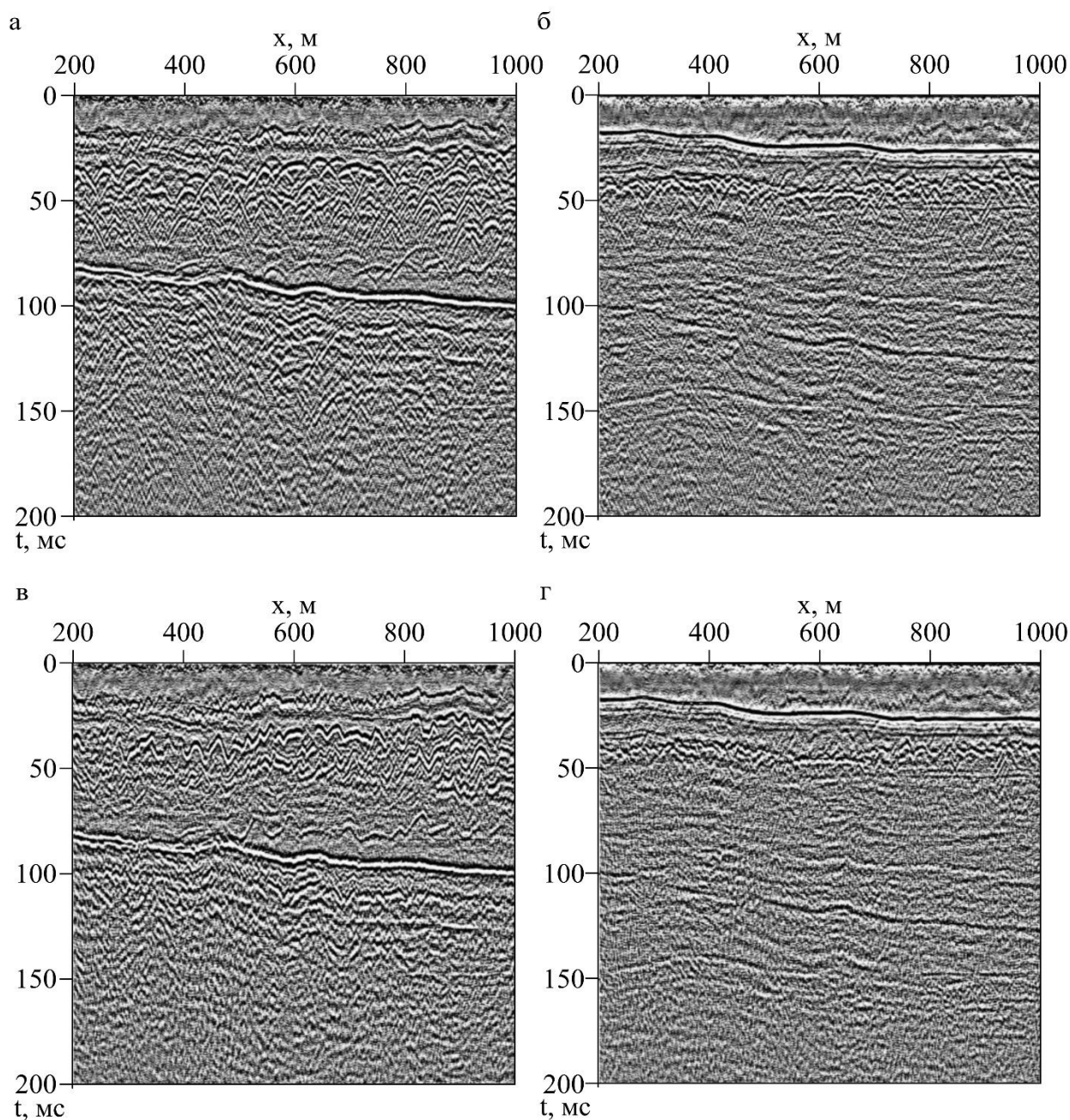
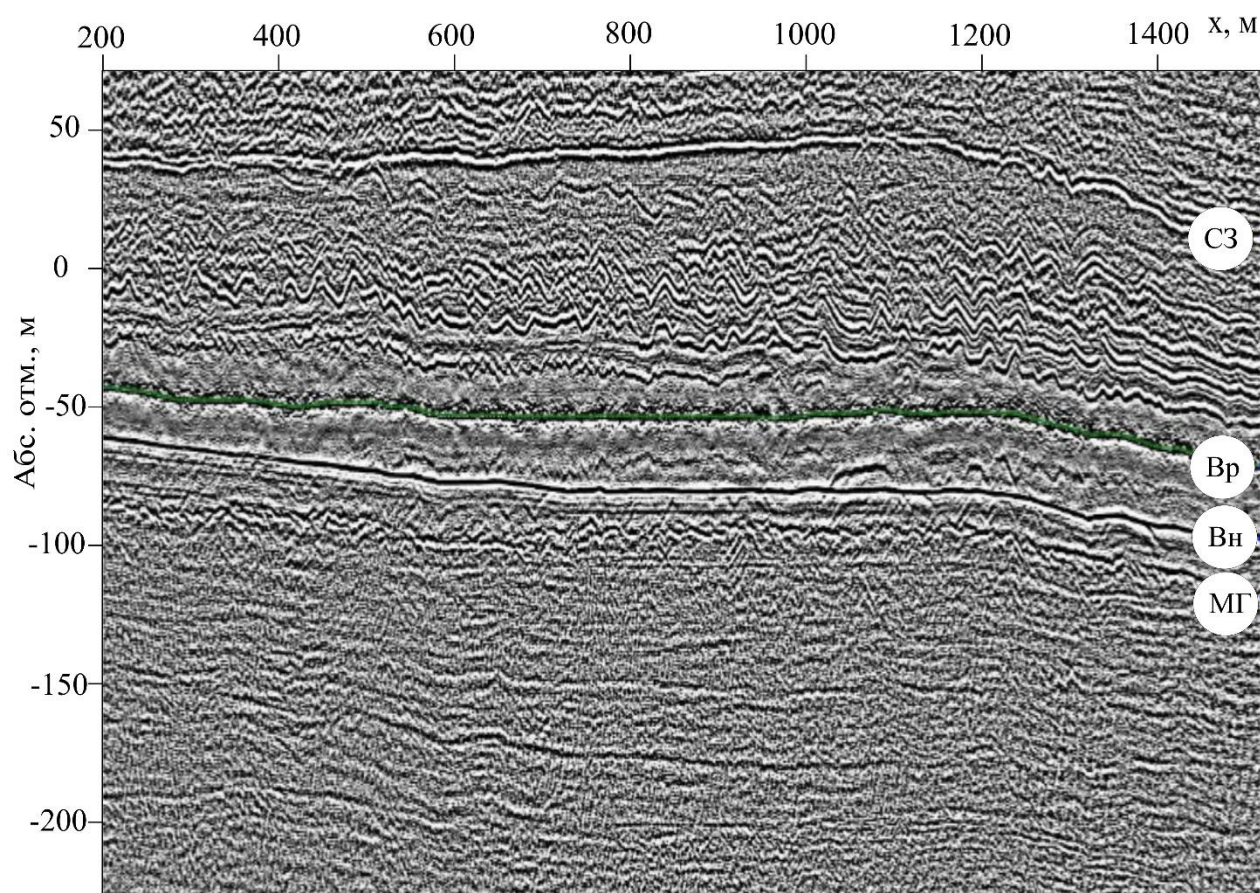


Рисунок 79 – Первичные временные разрезы: а – для верхнего полупространства; б – для нижнего полупространства (после процедур на рисунке 61 применены кинематические поправки, суммирование по ОГТ); окончательные временные разрезы: в – для верхнего полупространства; г – для нижнего полупространства (после процедур на рисунке 61, а, б, применены Т-К миграция, двумерная фильтрация) (по данным автора [224])

Преобразование время-глубина необходимо для корректной привязки отражающих горизонтов к геологическим границам и выполнения геологической интерпретации. Данное преобразование выполняется в соответствии со скоростным законом, полученным на этапе анализа скоростей ОГТ. Пространственно-временная фильтрация в небольшом окне (3–5 трасс) выполняется для легкого сглаживания глубинного разреза, что улучшает его восприятие и облегчает прослеживание отражающих горизонтов.

В результате применения описанных выше процедур получают разрезы в глубинной шкале, после чего с помощью процедуры введения статических поправок в них вводятся поправки за рельеф выработок, при этом поправки вводятся в глубинном масштабе. Рельеф всех выработок хранится в маркшейдерских и геологических службах, поэтому остается лишь проинтерполировать его с шагом точек ОГТ, преобразовать из абсолютной шкалы в относительную шкалу глубинных сейсмических разрезов и ввести в разрезы аналогично вводу статических поправок. После коррекции разрезов за рельеф, с помощью специально разработанной программы FastMineProc [244], либо с помощью графического редактора они объединяются в окончательную *геофизическую модель* (сводный глубинный разрез) со шкалой в абсолютных отметках относительно уровня моря (рисунок 80).

Геофизическая модель природно-технической системы, получаемая с помощью предлагаемого графа обработки, позволяет установить форму залегания основных геолого-геофизических границ, в том числе – соляного зеркала (первых сверху слоев соли), границ в КП, маркирующей глины, слоев глинистых мергелей в нижней части ПдКС, и кровли глинисто-ангидритовой толщи. Также представленная геофизическая модель позволяет установить наличие или отсутствие ВСД, опасных геологических процессов, их положение, характер и размеры. Данные сведения позволяют геологам детально оценить ИГУ на участках проектирования и строительства сооружений, а также состояние ПТС в условиях подземной разработки соляных месторождений.



Условные обозначения

СЗ - «соляное зеркало» Вр - рабочая выработка Вн - выработка ниже рабочей
МГ - маркирующая глина

Рисунок 80 – Геофизическая модель ПТС, в которой объединены разрезы для верхнего и нижнего полупространств, с учетом рельефа исследовательской выработки (по данным автора [102])

2.3.4 Оценка достоверности геофизических моделей

Оценка достоверности геофизических моделей ПТС в виде глубинных сейсмических разрезов выполнена на трех участках в районе Харюшинского поднятия. Она проводилась в два этапа с помощью увязки/отождествления отражающих горизонтов с литолого-стратиграфическими границами соляной части разреза в пределах каждого из рассматриваемых участков [69, 224].

На начальном этапе интерпретации были построены структурные поверхности основных элементов геологического разреза рассматриваемой территории – подошва четвертичных отложений, кровля соляно-мергельной толщи, соляное зеркало, кровля пласта Е, кровля пласта КрII, кровля МГ. При этом

построения выполнялись в двух вариантах – без использования данных подземных работ (данные бурения подземных скважин, зарисовки стенок горных выработок) и с использованием перечисленных сведений. В дальнейшем по каждому из профилей делался срез перечисленных выше поверхностей и строился контрольный геологический разрез (рисунок 81).

На втором этапе выполнялось сопоставление результатов геологического моделирования с имеющимися геофизическими моделями ПТС, полученными методом ПВРО (рисунок 82).

Для наглядности и эффективности корреляции тех или иных отражающих горизонтов с полученными геологическими границами, каждое четко видимое отражение было дополнительно закартировано (оцифровано) и «посажено» на контрольный геологический разрез (рисунок 83).

В результате геологической привязки выявлена высокая сходимость априорных данных об ИГУ с геофизической моделью ПТС, полученной методом ПВРО. Выделенные отражения совпадают с литолого-стратиграфическими границами, местами отклоняясь от них, что можно объяснить индивидуальными особенностями строения отдельно взятого пласта, которые невозможно учесть при построении контрольной геологической модели ввиду ограниченного набора исходных данных относительно размеров и формы дислокаций.

Следует отметить, что отражения тех или иных горизонтов полностью контролируются составом пород. Наиболее четкие границы прослеживаются по кровле соляной залежи и слою МГ, а также при карналлитовом составе пластов. Менее четко проявляются слои сильвинита на границах с каменной солью, и практически не прослеживаются отражения на участках, где продуктивные пласты представлены каменной солью, что подтверждается данными горных работ. Данный факт с достаточной уверенностью объясняется различием физико-механических свойств (в том числе различием прочности и плотности пород) между карналлитовой породой и сильвинитом/каменной солью. Так, по данным [20, 21, 137] предел прочности на одноосное сжатие для сильвинита и каменной соли варьируется в достаточно узких пределах от 22 до 26 МПа, тогда как для карналлитовой породы он составляет всего лишь около 8 МПа.

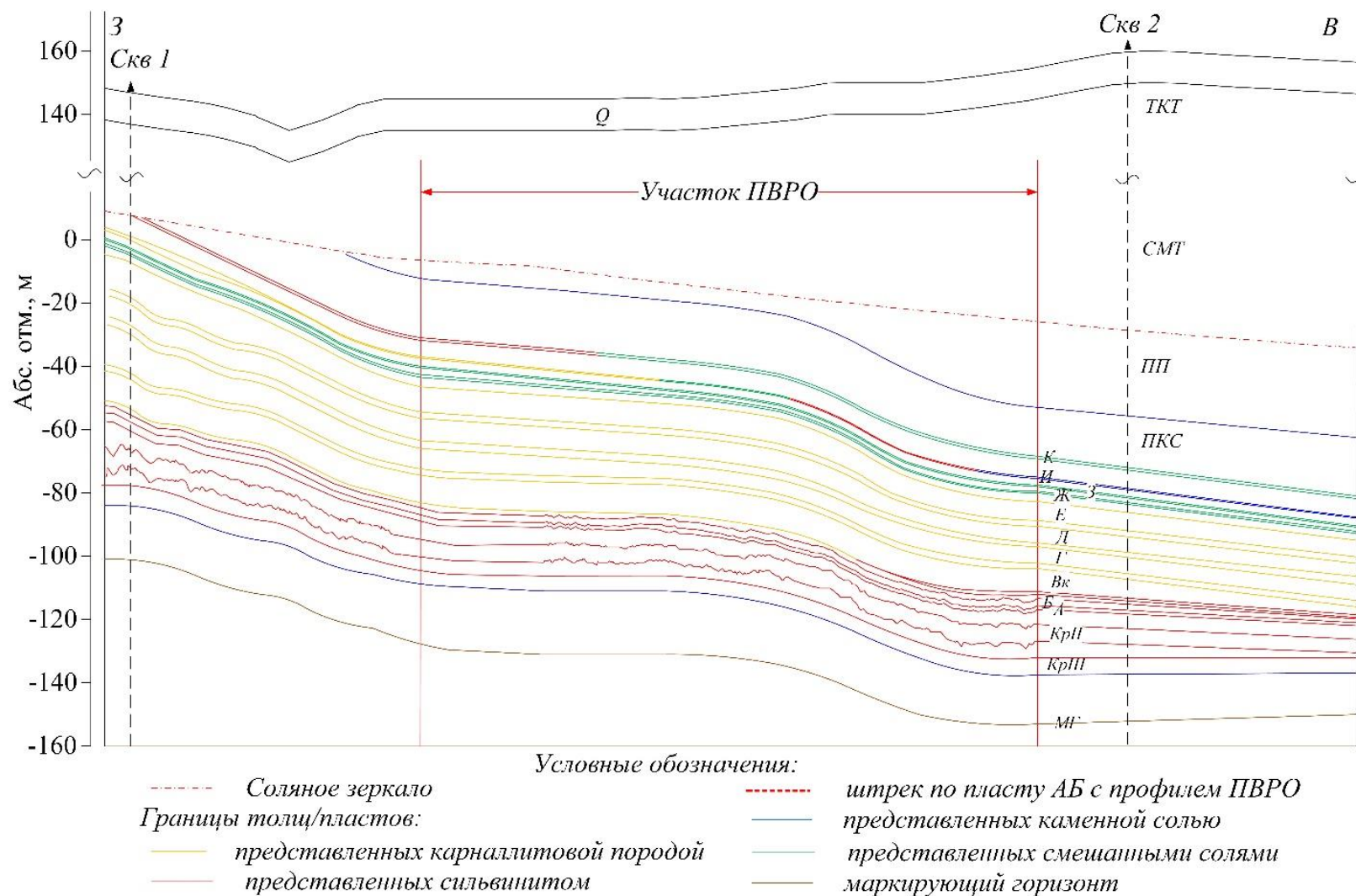
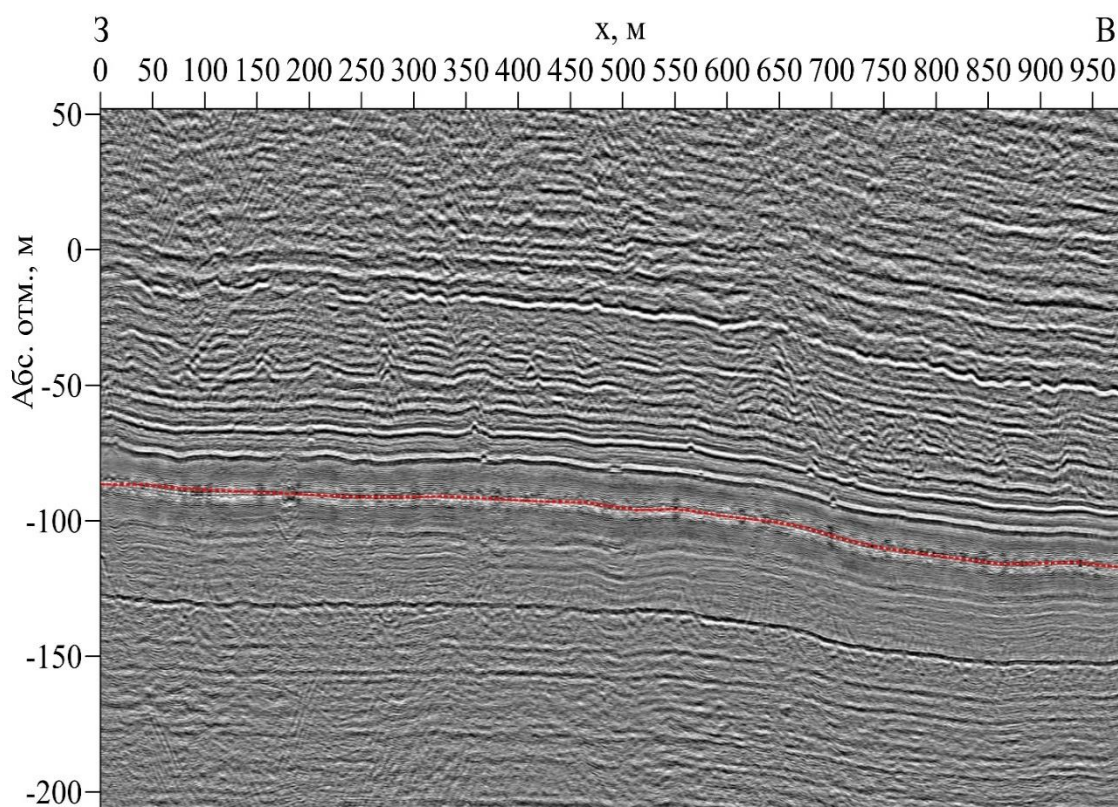


Рисунок 81 – Контрольный геологический разрез на одном из участков исследований (по данным автора [69, 224])



Условные обозначения:

- штрек по пласту АБ

Рисунок 82 – Геофизическая модель, полученная по результатам шахтной сейсморазведки методом ПВРО на рассматриваемом участке исследований (по данным автора [69, 224])

Стоит также добавить, что в карналлитовых пластах Г и Д нередко прослеживаются внутрипластовые слои каменной соли, а в покровной каменной соли – предположительно срединный слой, представленный переслаиванием мергелей и каменной соли. ИГУ по данным изучения геофизической модели ПТС на участке исследований характеризуются нормальным строением, без видимых нарушений структуры соляной толщи, таким образом ПТС находится в устойчивом состоянии.

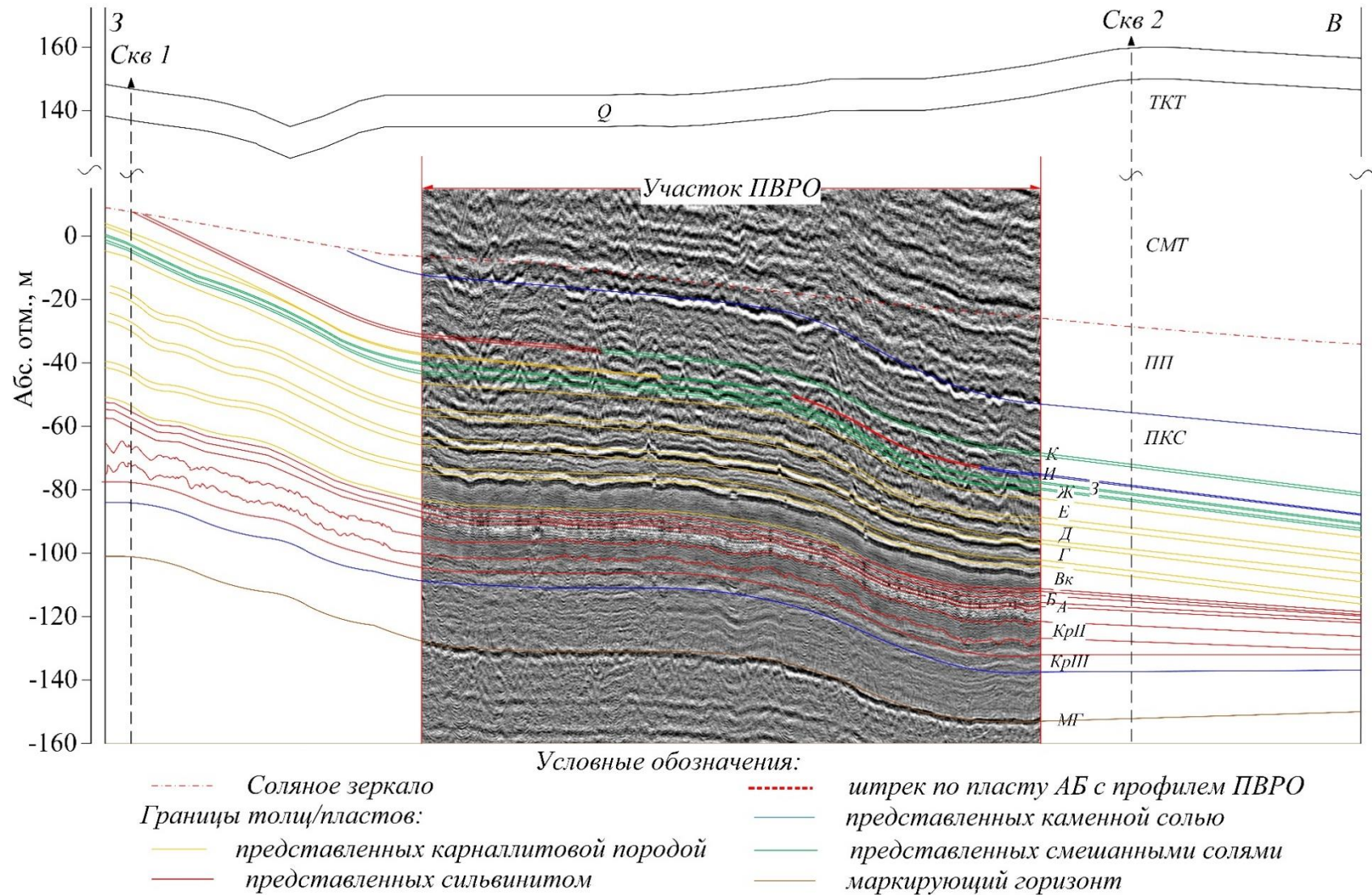


Рисунок 83 – Контрольный геологический разрез, совмещенный с геофизической моделью, полученной методом шахтной сейсморазведки методом ПВРО на одном из участков исследований (по данным автора [69, 224])

2.4 Выводы по главе

На основе результатов теоретических расчетов и натурных наблюдений, разработан метод шахтной сейсморазведки на поперечных волнах с разделением отражений. Метод включает в себя специально разработанные и обоснованные методики полевых работ и камеральной обработки. Методика полевых работ определяет требования к конструкции сейсмоприемников, способу их установки, способу возбуждения упругих колебаний, использованию двух линий возбуждения. Методика камеральных работ включает в себя граф обработки получаемых сейсмических материалов, в том числе способ разделения волновых полей, приходящих из разных полупространств.

По итогам оценки достоверности метода ПВРО, геофизические модели ПТС, построенные с его помощью, имеют высокую сходимость с представлениями о геологическом строении соляной толщи ВКМС на всех изученных участках. Возможность применения шахтной сейсморазведки методом ПВРО для построения геофизических моделей ПТС и их геологической интерпретации также была подтверждена высокой сходимостью с данными прямых методов (бурение скважин и проходка горных выработок) на других участках ВКМС, в том числе с аномальным строением ВЗТ. По результатам оценки достоверности метода установлено, что его разрешающая способность позволяет детально изучить ИГУ, в том числе – определить мощность ВЗТ, расчленить соляную толщу на ИГЭ или РЭ, а также выделять и изучать ВСД с детальностью до первых метров, что открывает прямой путь к оценке и прогнозу устойчивости ПТС в условиях подземной разработки соляных месторождений.

Описанная в главе методика построения геологических моделей ПТС без учета геофизической информации эффективна только на участках относительно спокойного залегания геологических пластов и соляного зеркала. В случае осложнения ИГУ для сохранения работоспособности методики необходимо привлечение материалов геофизических исследований. В этой связи, применение метода ПВРО обеспечивает получение новых сведений об инженерно-геологических условиях массива и существенную детализацию априорных геологических моделей, что, в свою очередь, позволяет повысить безопасность эксплуатации месторождения.

Для практической реализации разработанного метода, создан программный комплекс, позволяющий реализовать наиболее ресурсоемкие и сложные для

понимания этапы регистрации, контроля, обработки и интерпретации шахтных сейсморазведочных данных. Программный комплекс разработан с помощью свободно распространяемой среде разработки Lazarus [7, 168] и включил в себя следующие программы, зарегистрированные в государственном реестре программ для ЭВМ:

1. Программа контроля, документирования и экспресс-обработки данных полевых сейсморазведочных работ EJ. Версия 2.0 [243].
2. Расчет сдвигов для разделения отражений в способе ПВРО Shifts [242].
3. Программа обработки шахтных сейсмических данных FastMineProc [244].
4. Программа атрибутного анализа AtAn. Версия 1.0 [245].
5. Программа поиска годографов дифрагированных волн GodFind. [246].
6. Программа контроля, документирования и экспресс-обработки данных полевых сейсморазведочных работ EJ. Версия 1.0 [247].
7. Программа решения прямой задачи сейсморазведки для впередизабойного зондирования FS [248].
8. Программа решения обратной задачи сейсморазведки для впередизабойного зондирования FS [249].
9. Программа для проведения шахтной пространственной миграции в глубинной области MSDM [250].
10. . Программа расчета статических поправок StatPopr [251].
11. Программа создания протоколов для электротомографии ERTProto [252].
12. Программа привязки данных сейсморазведки PDS [253].

Таким образом, на основании численного моделирования, натурных экспериментов и выявленных закономерностей распространения упругих волн в условиях полного пространства, автором разработан и научно обоснован новый высокоразрешающий метод шахтной сейсморазведки для инженерно-геологических исследований. Метод основан на использовании поперечных волн от направленного источника упругих колебаний, включает в себя согласованные между собой методику полевых работ и методику камеральной обработки, и обеспечивает оперативное получение структурных, тектонических и физико-механических характеристик массивов горных пород, взаимодействующих с подземными сооружениями с детальностью до 1-2 м.

Глава 3. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ВЫЯВЛЕНИЕ ОПАСНЫХ ПРОЦЕССОВ

Второе защищаемое научное положение. Разработаны инженерно-геологические модели природно-технических систем соляных месторождений, основанные на трёхстадийной технологии построения: по данным бурения, с привлечением данных горных выработок и с использованием метода шахтной сейсморазведки ПВРО. Модели учитывают геологическое строение, геоморфологические признаки и выделяют структурные элементы по различиям в упругих свойствах горных пород, что позволило выявить и включить в модели ранее неизвестные для Верхнекамского месторождения каньонообразные эрозионные врезы, и уточнить морфологию инверсионного рельефа.

Безопасность сооружений и устойчивость ПТС в условиях подземной разработки соляных месторождений зависит от большого количества факторов. Главную роль среди них играют инженерно-геологические условия [259, 285, 299], в том числе тектоническое строение [70, 84] и физическое состояние горного массива. На месторождениях солей безопасность подземных сооружений определяется, в первую очередь, строением и составом водозащитной толщи, которая является естественным водоупором, предотвращающим проникновение пресных вод в рудники и последующую потерю подземных комплексов. В условиях ВКМС на большей его части в пределах продуктивного интервала и интервала ВЗТ наблюдается субгоризонтальное и параллельно-слоистое залегание соляных пластов.

С одной стороны, данная ситуация позволяет использовать высокопроизводительные способы строительства подземных сооружений, в том числе проходческие комбайновые комплексы, но, с другой стороны, предположение о повсеместно распространенном «простом» геологическом строении порой приводит к катастрофическим последствиям [22, 305, 307, 313, 315]. Причины аварийных ситуаций, произошедших на ВКМС до сих пор являются предметом научных дискуссий, но один вывод не подлежит сомнениям – специалистам известны далеко не все геологические особенности эксплуатируемых месторождений солей, в том числе и ВКМС. Иначе говоря,

формируемые традиционными способами инженерно-геологические модели природно-технических систем не всегда позволяют выявлять опасные процессы, связанные с тектоническим строением и физическим состоянием горного массива.

3.1 Структурно-тектоническая динамическая модель соляного поднятия в пределах ВКМС

Одним из наиболее опасных геологических явлений на ВКМС с точки зрения строительства и эксплуатации подземных сооружений является так называемый инверсионный рельеф, отмечаемый в кровле солей на куполах ряда соляных поднятий. Инверсионный рельеф возникает из-за растворения верхних по разрезу соляных пластов подземными водами в ходе формирования поднятия, и выглядит как чашеобразное углубление в его своде. Опасность данное явление представляет в силу уменьшения мощности ВЗТ, и, как следствие, увеличения вероятности прорыва подземных вод в подземные сооружения. Известен случай, когда используемая сеть бурения, отвечающая требованиям нормативных документов, в комплексе с традиционно используемыми методиками построения геофизических и инженерно-геологических моделей не позволили выявить обширную область инверсионного рельефа, в связи с чем возник приток воды в подземные сооружения.

Кроме того, в ходе промышленного опробования метода шахтной сейсморазведки ПВРО, разработанного автором, были выявлены неизвестные ранее на ВКМС геологические структуры, называемые каньонообразными эрозионными врезами, или просто эрозионными врезами (ЭВ) [211, 224]. Так, например, ниже представлена геофизическая модель ПТС, полученная на одном из поднятий в пределах ВКМС (рисунок 84). Из рисунка хорошо видно, как соляное зеркало увеличивает абсолютные отметки слева на право в пределах пикетов от 0 до 3000 м, отображая тем самым существующее здесь соляное поднятие. Однако, после пикета 3000 м рассматриваемая граница принимает форму инверсионного рельефа, похожего по форме на блюдце. В пределах указанного участка инверсионного рельефа, в правой части геофизической модели фиксируется резкое погружение соляного зеркала, которое представляет собой достаточно глубокий эрозионный врез.

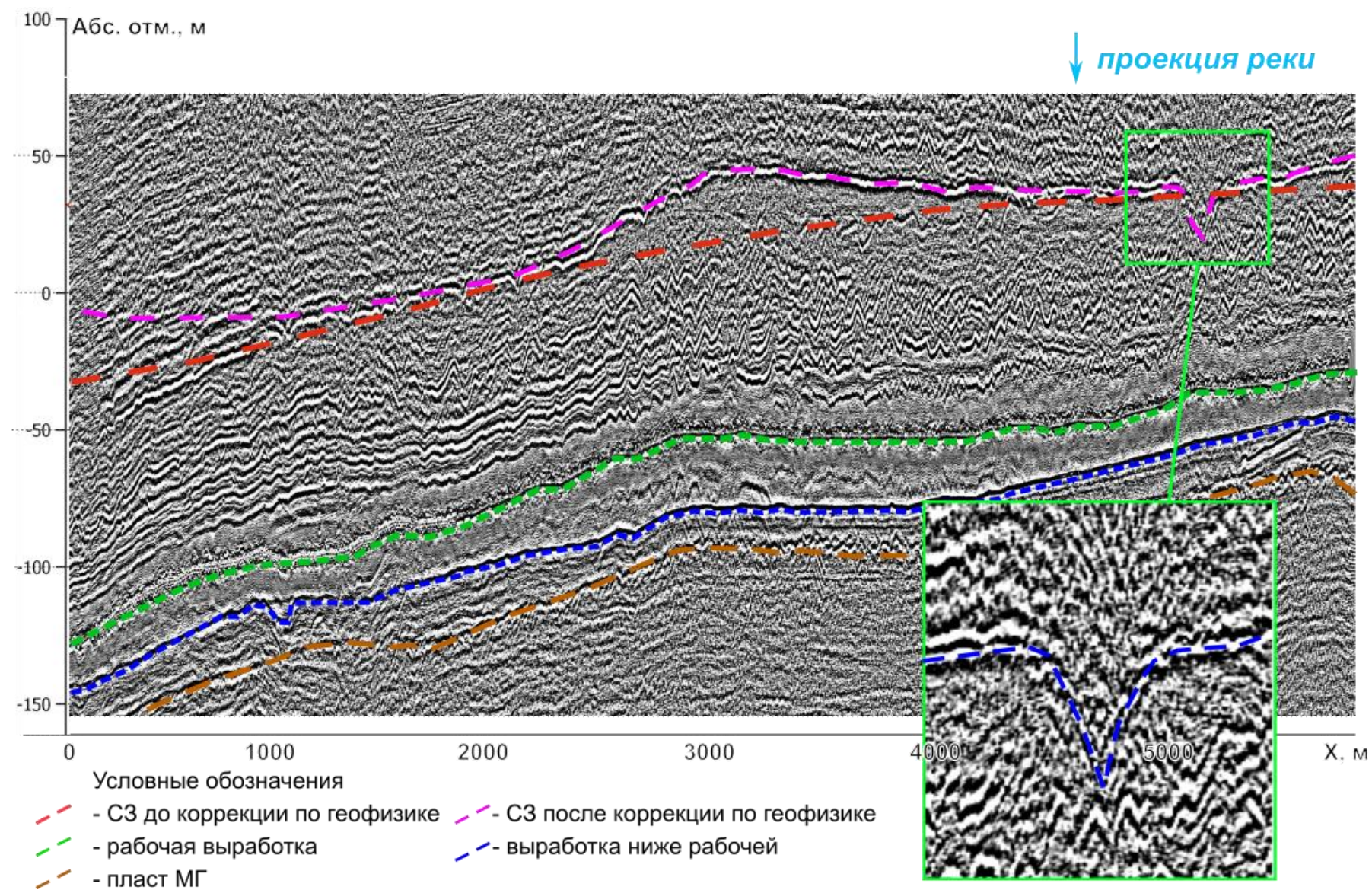


Рисунок 84 – Геофизическая модель ПТС в области одного из соляных поднятий на ВКМС (по данным автора [101])

Все обнаруженные на сегодняшний день на ВКМС эрозионные врезы находятся в области соляных поднятий в пределах участков инверсионного рельефа. Опасность ЭВ заключается в том, что даже если инверсионный рельеф не достигает опасных пределов растворения ВЗТ, то ЭВ может значительно превысить эти пределы. Например, на структурно-динамической модели соляного поднятия, соответствующей представленной выше геофизической модели, инверсионный рельеф достигает только кровли КП, а каньонообразный ЭВ при этом практически достигает СП, в пределах которой уже имеются капитальные подземные сооружения (рисунок 85). Очевидно, что данная ситуация несет серьезную опасность для всей ПТС, и для существующих подземных сооружений в частности.

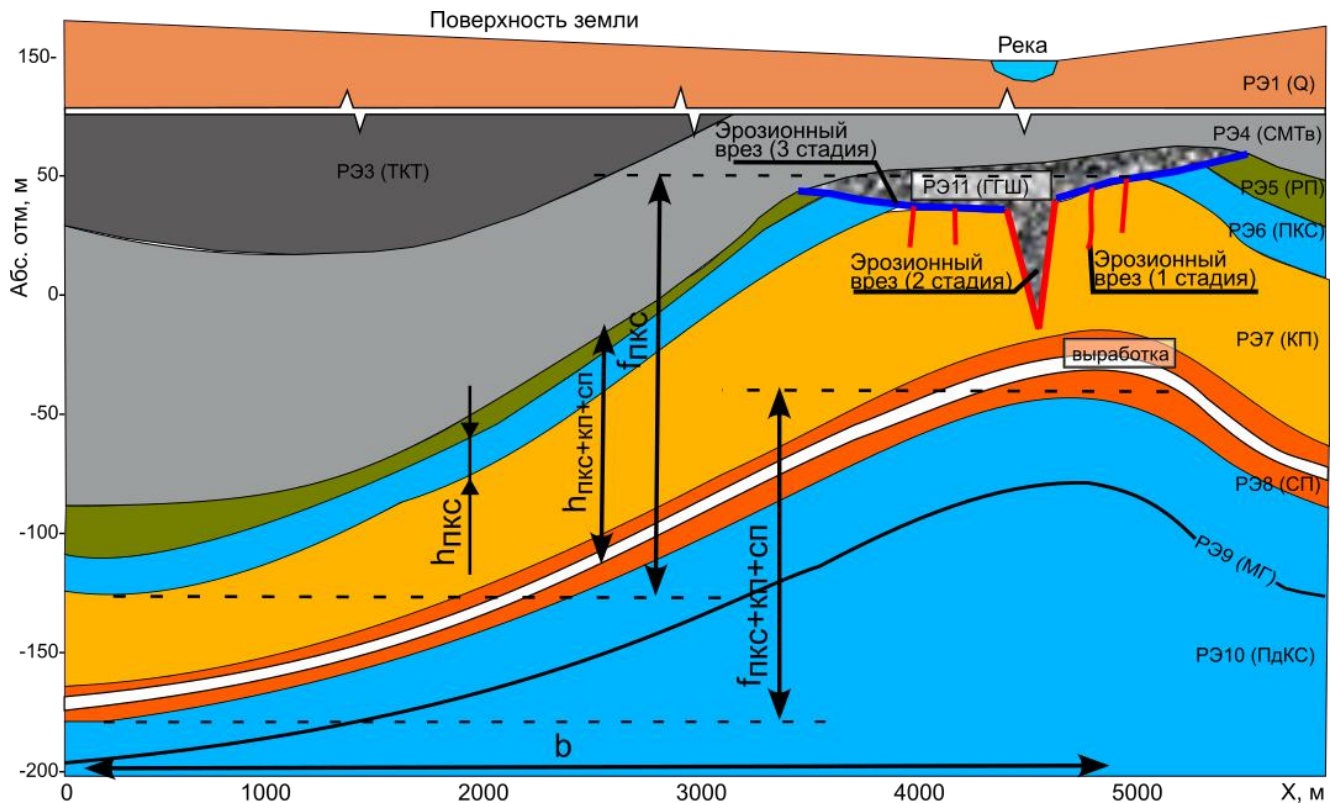


Рисунок 85 – К разработке структурно-тектонической динамической модели соляного поднятия в пределах ВКМС (f – высота изгиба пластины, h – толщина пластины, b – длина пластины (по данным автора [214])

Для того, чтобы инженерно-геологические модели природно-технических систем более полно отображали изучаемую среду и позволили выявлять опасные процессы, связанные с тектоническим строением и физическим состоянием горного массива, необходимо объяснить и обосновать природу и динамику

обнаруженного геологического явления и включить его в динамические модели ПТС.

Как известно [157] в изометричных куполах зачастую возникают трещины отрыва, которые развиваются по радиусам и концентрически, а в овальных (брахиформных) и линейных антиклиналях появляются два направления трещин отрыва, параллельные длинной и короткой оси (рисунок 86). Опыт проходки выработок в сильвинитовой пачке показывает, что трещины в соли встречаются относительно часто, поэтому их образование в кровле солей также вполне ожидаемо.

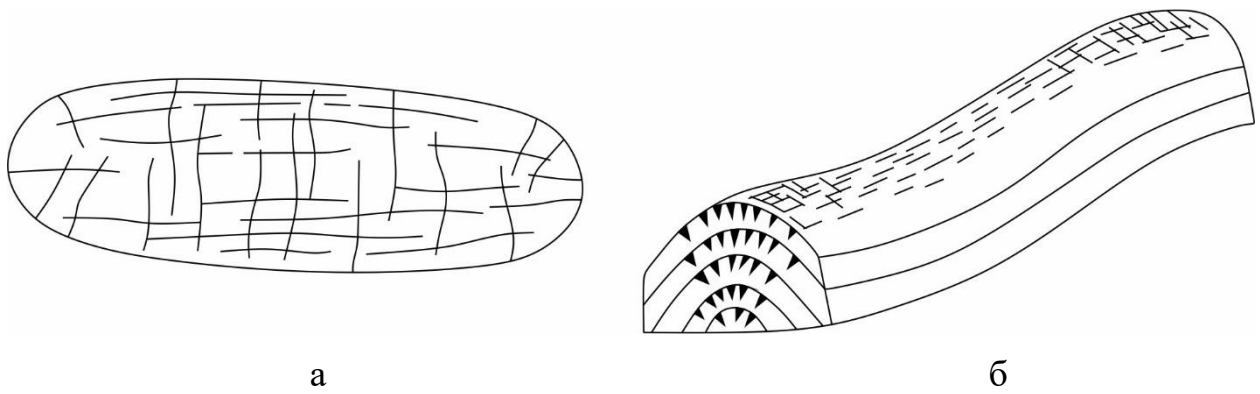


Рисунок 86 – Схема расположения трещин отрыва в брахиантиклинали (а) и линейной (б) антиклинальной складке (по материалам [175])

Таким образом, с геологической точки зрения, вероятнее всего, первой стадией формирования эрозионных врезов является образование соляных поднятий (рисунок 87, а), в сводах которых далее возникают трещины отрыва (рисунок 87, б). Подсечь подобные трещины в кровле ВЗТ скважинами практически невозможно, а обнаружить геофизическими методами, в том числе методом шахтной сейсморазведки ПВРО, в виду их малого раскрытия, тоже маловероятно. Однако в результате расширения трещины эрозионными процессами ослабленная зона приобретает каньонообразную форму и обширные размеры, достаточные для обнаружения сейсморазведкой, что мы и наблюдаем в ходе геологоразведочных работ (рисунок 85). То есть, причиной возникновения каньонообразного вреза, обнаруженного с помощью сейсморазведки способом ПВРО, является трещина или серия трещин отрыва, сформированных в ходе формирования поднятия.

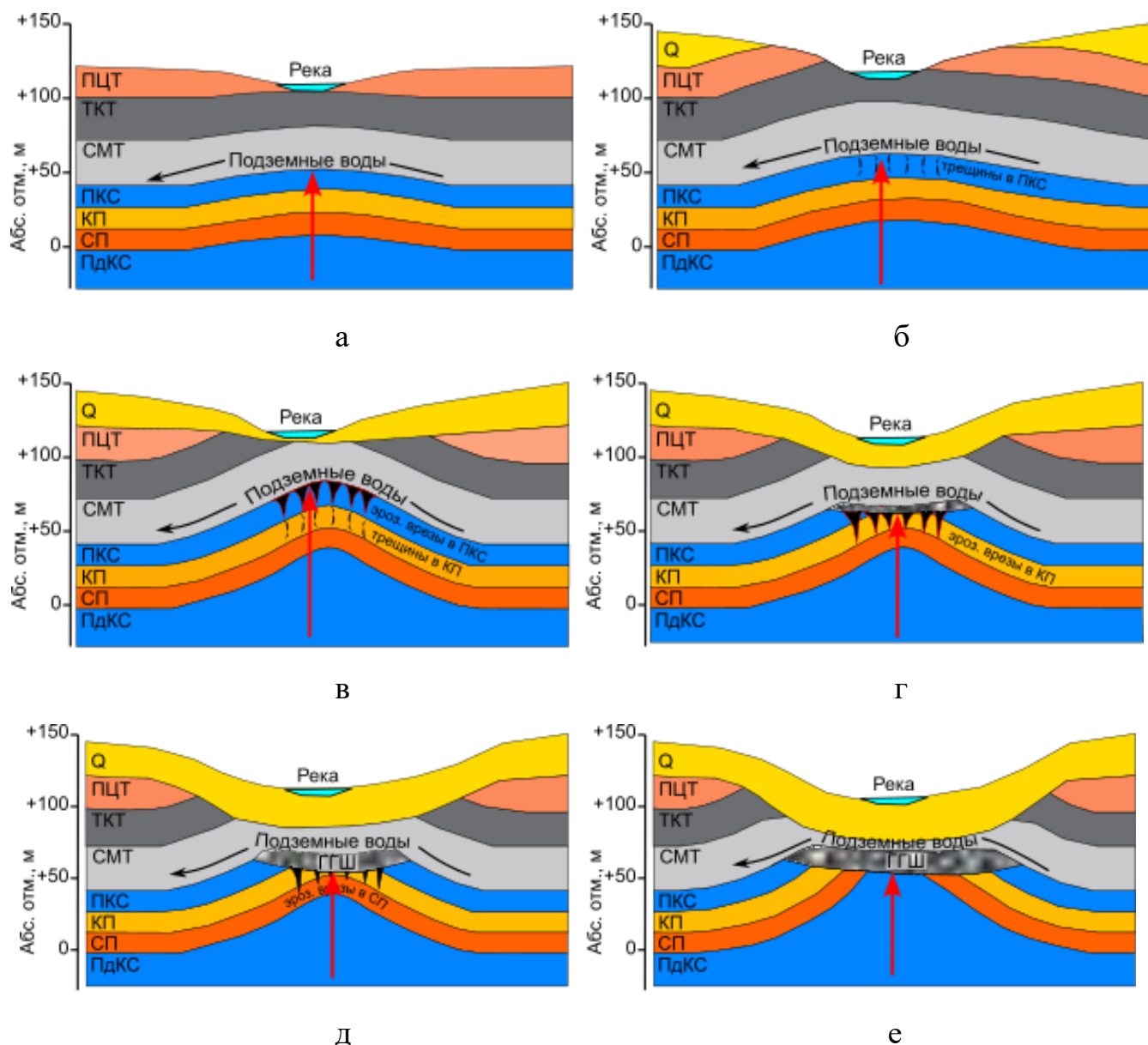


Рисунок 87 – Генезис формирования трещин, эрозионных врезов и инверсионного рельефа в ВЗТ и стадии динамической модели их возникновения: а – начало поднятия солей, б – эрозия перекрывающих пород, появления трещин отрыва в ПКС, в – появление трещин в КП и расширение трещин в ПКС до эрозионных врезов, г – начало формирования ГГШ, д – увеличение ГГШ до КП, е – увеличение ГГШ до ПдКС (по данным автора)

С точки зрения геомеханики, возможной причиной образования трещин в сводовой части поднятия может быть высокая скорость деформации при недостаточном давлении вышележащих пород, при которой соляной массив ведет себя как хрупкое тело. В результате дальнейших деформаций и процессов

растворения возникшие трещины отрыва достаточно быстро, в геологическом понимании, выщелачиваются до размеров каньонообразных эрозионных врезов (рисунок 87, в), параллельно с этим в результате растворения больших объемов солей начинает формироваться инверсионный рельеф по кровле антиклинального поднятия соляной толщи. Растворение значительных объемов солей сопровождается оседанием вышележащих ИГЭ, и приводит к возникновению отрицательных форм рельефа поверхности, хорошо коррелируемых со сводом соляного поднятия (рисунок 87).

Более глубокие и менее многочисленные ЭВ так и остаются каньонообразными, а более мелкие и более многочисленные «прорабатываются» подземными водами до чашеобразного инверсионного рельефа, формируется глинисто-гипсовая шляпа (ГГШ) (рисунок 87, г). На завершающих стадиях процессы выщелачивания могут достичь карналлитовой пачки (рисунок 87, д), или даже сильвинитовой пачки или подстилающей каменной соли (рисунок 87, е).

Помимо растворения солей и образования инверсионного рельефа, трещины и эрозионные врезы в сводах соляных поднятий приводят к активной миграции флюидов через толщу калийно-магниевых солей, и возникновению еще одного вида опасных процессов – замещению одних солей другими. В результате возникают области, называемые *зонами замещения, или зоны разубоживания*. Зоны замещения (разубоживания) в калийных и магниевых солях – это области горного массива, где один минерал замещается другим, как правило карналлит замещается сильвинитом, а сильвинит – каменной солью. В таких зонах фиксируется резкое изменение инженерно-геологических условий, в том числе – существенное (в два и более раз) уменьшение мощности слоев исходного материала, вторичное уплотнение пород, формирование мульд сдвижения, развитие разрывных дислокаций. Кроме того, с зонами замещения очень часто связаны газодинамические явления – внезапные выбросы соли и газа в подземные сооружения. Такие явления могут привести к травмам и гибели людей и к разрушению подземных сооружений и подземной инфраструктуры.

Примерно 80 % газодинамических явлений на сильвинитовых пластах Верхнекамского месторождения произошли в местах с явными признаками эпигенетических изменений как самих продуктивных пластов, так и вмещающих

пород. Особенности геологического строения мест развития газодинамических явлений различного вида позволяют с уверенностью предполагать, что их очаги приурочены к путям миграции в соленосной толще водных растворов, чему, в том числе, активно способствуют трещины и эрозионные врезы в кровле соляных поднятий [9, 212].

В источниках, касающихся газодинамических явлений на Верхнекамском месторождении солей, основным объектом внимания всех исследований и выводов являются зоны замещения в интервале продуктивных пластов, поскольку они, собственно, и являются источником опасности по газодинамическим явлениям (ГДЯ). Трещины же и эрозионные врезы в кровле соляных отложений навряд ли могут приводить к таким замещениям, которые могли бы вызвать газодинамические явления в подземных сооружениях, поскольку основной гипотезой о природе их возникновения является предположение о вертикальном движении газонасыщенных флюидов, мигрирующих по трещинам и каналам в соляных породах снизу-вверх.

Однако, возникновение самих зон замещения в области трещин и эрозионных врезов в кровле солей совсем не исключено, а скорее даже вполне вероятно. Неизвестно, сопутствуют ли данным зонам замещения скопления газов, поскольку геологоразведочные и горные работы в области покровной каменной соли и нижней части соляно-мергельной толщи не ведутся, однако, по аналогии с зонами замещения в продуктивной толще, о существенном изменении физических и физико-механических свойств горных пород можно говорить с уверенностью.

Количественная оценка указанных изменений с помощью шахтной сейсморазведки на данной стадии развития науки затруднена, поскольку бурение разведочных скважин из шахты выше пласта В запрещено, а поверхностные скважины, расстояние между которыми составляет обычно два километра, пересекают такие зоны в единичных случаях. Для выполнения корреляционного анализа между упругими свойствами пород, получаемыми по данным шахтной геофизики, и степенью изменения физико-механических свойств пород необходима представительная выборка, для формирования которой на данный момент нет практически никаких данных.

Тем не менее, объективная информация о самом факте наличия или отсутствия в кровле солей зоны замещения и ее геометрических размерах ведет к далеко идущим выводам, существенно влияющим на безопасность строительства и эксплуатации сооружений подземных комплексов [282, 283]. Так, согласно научным исследованиям в области геомеханики [15–16, 20, 22–24], устойчивость подземных сооружений на Верхнекамском месторождении солей во многом определяется составом пород, входящих в водозащитную толщу. Главенствующую роль при этом играет суммарная мощность неизменных слоев каменной соли. Очевидно, что достоверная информация о положении и границах зоны замещения в интервале водозащитной толще напрямую влияет на результаты геомеханических расчетов, которые, в свою очередь, определяют параметры системы разработки и саму возможность строительства подземных сооружений, а в конечном счете – устойчивость всей ПТС.

3.2 Геолого-геомеханическое обоснование природы эрозионных врезов

Важно понять, насколько высказанное выше предположение о причинах возникновения трещин в солях обосновано с геомеханической точки зрения, поскольку генеральные углы падения толщ незначительны и измеряются первыми градусами. Выполненные геомеханические расчеты показывают, что в подобных перегибах пластовое тело должно испытывать разрывные деформации с образованием трещин отрыва в областях наибольшего перегиба. Данное заключение подтверждают нижеприведенные расчеты.

Рассмотрим изгиб упругого слоя в виде круглой пластины толщиной h , защемленной по кольцевому слою с внутренним радиусом b , находящейся под действием равномерно распределенного давления q . При условии $h/b \ll 1$ пластину можно рассматривать как тонкую, в которой действуют радиальные σ_r и окружные σ_ϕ напряжения в плоскости пластины, касательные напряжения отсутствуют.

Приближенные выражения для радиальных (σ_r/E) и окружных (σ_ϕ/E) деформаций [227] имеют вид:

– в центре пластины:

$$\sigma_r / E = \sigma_\varphi / E = \left(\frac{h}{b}\right)^2 \left[2,86 \left(\frac{f}{h}\right) + 0,976 \left(\frac{f}{h}\right)^2 \right] \quad (24)$$

– на контуре пластины:

$$\sigma_r / E = \left(\frac{h}{b}\right)^2 \left[4,40 \left(\frac{f}{h}\right) + 0,476 \left(\frac{f}{h}\right)^2 \right] \quad (25)$$

$$\sigma_\varphi / E = \left(\frac{h}{b}\right)^2 \left[1,32 \left(\frac{f}{h}\right) + 0,145 \left(\frac{f}{h}\right)^2 \right] \quad (26)$$

Стрела прогиба (в центре пластины) f определяется из уравнения

$$2,762 f^2 + 5,862 f = (q/E)(b/h)^4 \quad (27)$$

где E – модуль упругости.

В данной задаче мы полагаем, что нам известна величина максимального прогиба f , поэтому нет необходимости знать величину давления q и решать уравнение (27).

Из соотношений (24) – (26) получим в частном случае при $f = h$

– в центре пластины:

$$\sigma_r / E = \sigma_\varphi / E = 3,84 \left(\frac{h}{b}\right)^2 \quad (28)$$

– на контуре пластины:

$$\sigma_r / E = 4,88 \left(\frac{h}{b}\right)^2, \sigma_\varphi / E = 1,47 \left(\frac{h}{b}\right)^2 \quad (29)$$

Отметим, что соответствующие деформации близки к полученным величинам радиальной $\varepsilon_r \sim \sigma_r / E$ и окружной $\varepsilon_\varphi \sim \sigma_\varphi / E$.

Таким образом, если радиус круглого слоя на порядок больше его мощности, то в центре пластины возникают радиальные и окружные деформации порядка 3,84 %, что конечно приводит к образованию трещин в верхней центральной части слоя. На периферии радиальные деформации примерно 4,88 % значительно превышают окружные 1,47 %. Это означает появление касательных к внешнему контуру слоя трещин, расположенных в его нижней части.

Выделим характерные размеры на геологическом разрезе (рисунок 85). Рассмотрим слой покровной каменной соли (голубой цвет) мощностью около 20 м, со стрелой прогиба $f_{\text{ПКС}} = 170$ м, а также суммарную толщу КП, СП и ПКС

мощностью около 100 м, со стрелой прогиба $f_{\text{ПКС+КП+СП}} = 140$ м. Расстояние от невозмущенного слоя до максимального поднятия порядка 2000-4000 м.

На основании выражений формул (24) – (26) [211], получим для ПКС с учетом $f/h = 170/20 = 8,5$ и $\frac{h}{b} = \frac{20}{2000-4000} = 0,005-0,01$:

$$\text{– в центре поднятия: } \frac{\sigma_r}{E} = \frac{\sigma_\varphi}{E} = 0,24\% - 0,95\% ;$$

$$\text{– на контуре } \frac{\sigma_r}{E} = 0,18\% - 0,41\%, \frac{\sigma_\varphi}{E} = 0,054\% - 0,22\% .$$

Аналогичные данные для всей толщи, включающей СП, КП и ПКС с учетом $f/h = 140/100 = 1,4$ и $\frac{h}{b} = \frac{100}{2000-4000} = 0,025-0,05$:

$$\text{– в центре поднятия: } \frac{\sigma_r}{E} = \frac{\sigma_\varphi}{E} = 0,37\% - 1,48\% ;$$

$$\text{– на контуре } \frac{\sigma_r}{E} = 0,44\% - 1,77\%, \frac{\sigma_\varphi}{E} = 0,13\% - 0,53\% .$$

В обычных условиях, при сжатии образцов (отношение высоты к диаметру = 2,0) сильвинита и карналлита (с разными скоростями перемещения траверсы испытательной машины 0,1 мм/мин–10 мм/мин) имеем соответствующие средние значения для предельной деформации 2,5–2,0 % (сильвинит), 3,5–1,8 % (каменная соль) и 0,72–0,32 % (карналлит).

При растяжении образцов, как для предельных напряжений, так и для предельных деформаций, соответствующие значения на порядок ниже, чем при сжатии. Так, предельные деформации при растяжении сильвинита можно оценить, как 0,25–0,2 %, каменной соли 0,35–0,18 %, а карналлита 0,072–0,032 %. Результаты описанных расчетов для представленной модели, и значения, полученные для образцов солей в лабораторных условиях, сведены для удобства анализа в одну таблицу (таблица 3).

Очевидно, что полученные деформации при оценке изгиба геологических слоев имеют такой же порядок, и даже превосходят предельные значения. Конечно, в условиях очень медленных деформаций ползучести (за геологические времена) предельные деформации могут увеличиваться. Однако, и сами деформации ползучести могут значительно (на порядок) превышать упругие деформации для которых производилась их оценка.

Таким образом, геомеханическая оценка деформаций при изгибе поднимаемых слоев говорит о возможности появления трещин в центре поднятия как в ПКС, так и в близлежащих к выработкам СП и КП. Эти трещины способствуют растворению верхних слоев солей подземными водами, что и наблюдается в реальности на геофизических разрезах. Кроме растворения солей, миграция рассолов приводит и к процессам замещения одних солей другими, как это уже описывалось выше.

Таблица 3 – Результаты геомеханических расчетов деформаций для модели ПТС (рисунок 85)

Деформация		Расчет для ПКС		Расчет для ПКС+КП+СП	
		Центр поднятия	Контур поднятия	Центр поднятия	Контур поднятия
Расчетная	σ_r/E	0,24-0,95%	0,18-0,41%	0,37-1,48%	0,44-1,77%
радиальная					
Расчетная	σ_ϕ/E	0,24-0,95%	0,054-0,22%	0,37-1,48%	0,13-0,53%
окружная					
Пределная по лаборатории	Для каменной соли	0,18-0,35%			
	Для карналлита	0,032-0,072%			
	Для сильвинита	0,2-0,25%			

Аналогичные трещины могут возникать и на периферии (контуре) поднятия, но уже в нижней части слоев [268]. Если ПКС деформируется отдельно от СП и КП, то это будут трещины (касательные к контуру) в нижней части ПКС на контуре. Если ПКС деформируется совместно с СП и КП как одно целое, то подобные трещины могут возникать и в нижней части СП и КП. Поскольку доступ воды в эти области ограничен, то трещины могут наблюдаться в реальности в виде вертикальных нарушений сплошности соляного массива.

Отметим также, что на территории ВКМС есть значительное число поднятий, склоны которых более крутые, чем у рассмотренного выше. Это означает, что деформации на их сводах будут еще больше, поэтому, все сделанные выводы по трещиноватости там должны будут проявляться более значимо.

Таким образом, выполненные исследования подтверждают правильность гипотезы о генезисе ЭВ и инверсионного рельефа. Это дает возможность включить данные опасные процессы в инженерно-геологические модели ПТС, и выявлять их при изучении и уточнении ИГУ и оценке устойчивости ПТС при подземной разработке соляных месторождений.

3.3 Технология построения инженерно-геологической модели

Автором предлагается *трехстадийная технология построения инженерно-геологической модели ПТС* [69]. Базой для *первого этапа* служит геологическая информация, полученная по результатам бурения поверхностных скважин. Итогом этого этапа является приближенная инженерно-геологическая модель ПТС с границами ИГЭ и расчетных элементов, построенными с помощью линейной интерполяции между скважинами (рисунок 88, а). Очевидно, что при расстоянии между поверхностными скважинами, составляющем, как правило, два километра, формируемая на данном этапе инженерно-геологическая модель ПТС позволяет установить лишь самые общие сведения об ИГУ на изучаемом участке, чего недостаточно для формирования полноценных исходных данных и принятия обоснованных проектных решений.

На *втором этапе* инженерно-геологическая модель уточняется, для чего привлекаются данные проходки горных выработок [176]. На их основе выявляются закономерности геологического строения, которые позволяют строить модели с гораздо более высокой степенью достоверности (рисунок 88, б), чем на основе простой линейной интерполяции между скважинами. К таким закономерностям относятся: корреляция между абсолютными отметками кровли основных инженерно-геологических элементов (ИГЭ), распределение мощности ИГЭ или расчетных элементов в зависимости от расстояния до оси поднятия, связь между мощностью и суммарными углами залегания ИГЭ, соотношение между литологическими разновидностями пород в расчетных элементах.

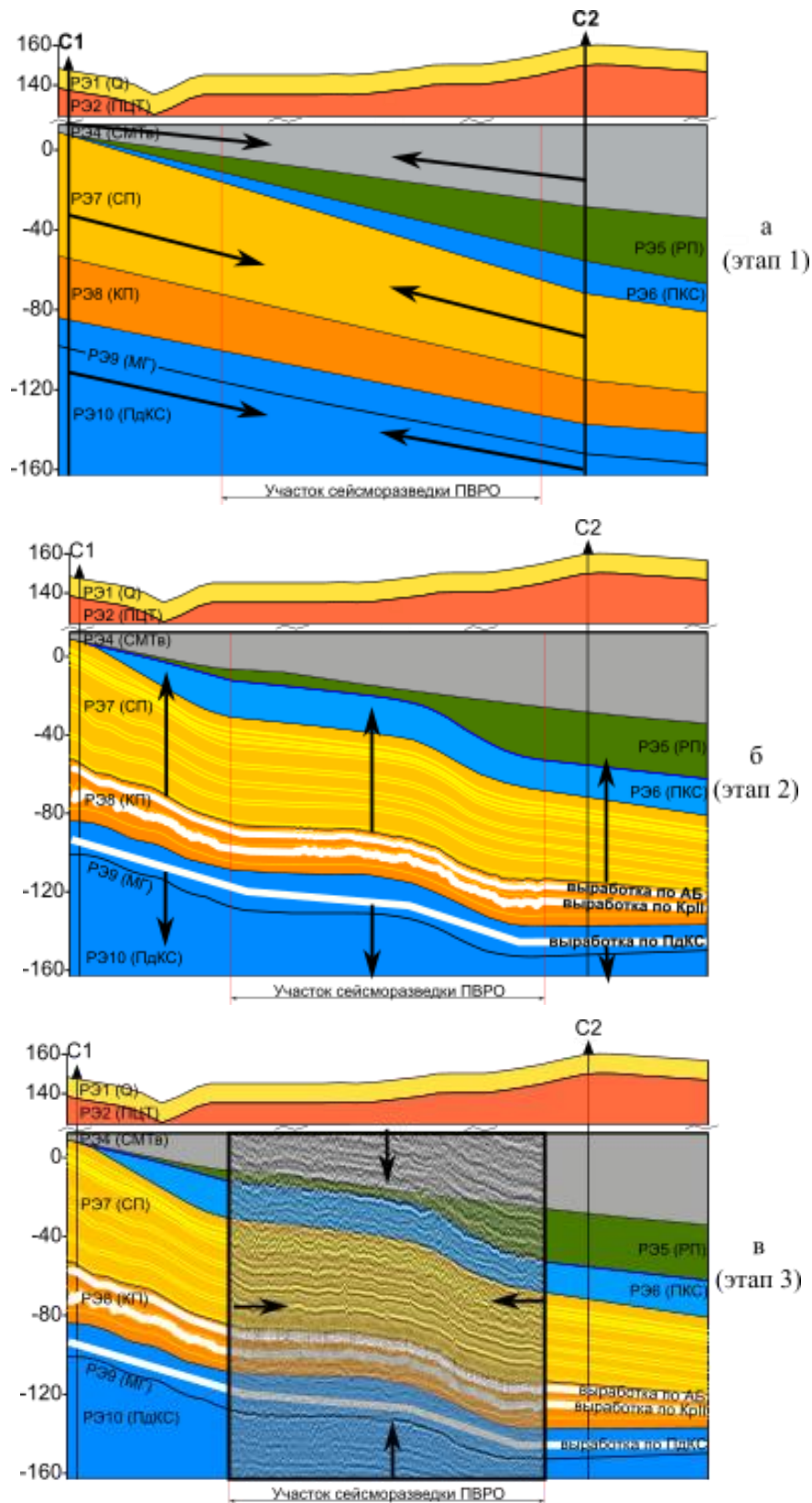


Рисунок 88 – Этапы построения инженерно-геологических моделей ПТС: а – по данным бурения скважин, б – с учетом результатов проходки горных выработок, в – с учетом результатов шахтных сейсморазведочных работ ПВРО (по данным автора [214])

Рассмотрим реализацию второго этапа построения инженерно-геологической модели ПТС на примере одного из участков, примыкающих к Харюшинскому поднятию, расположенному в границах ВКМС. В первую очередь производится структурный анализ поверхностей кровли пластов и толщ (таблица 4), а также анализ мощностей между отдельными «реперными» слоями непосредственно в границах участка исследований и вблизи него.

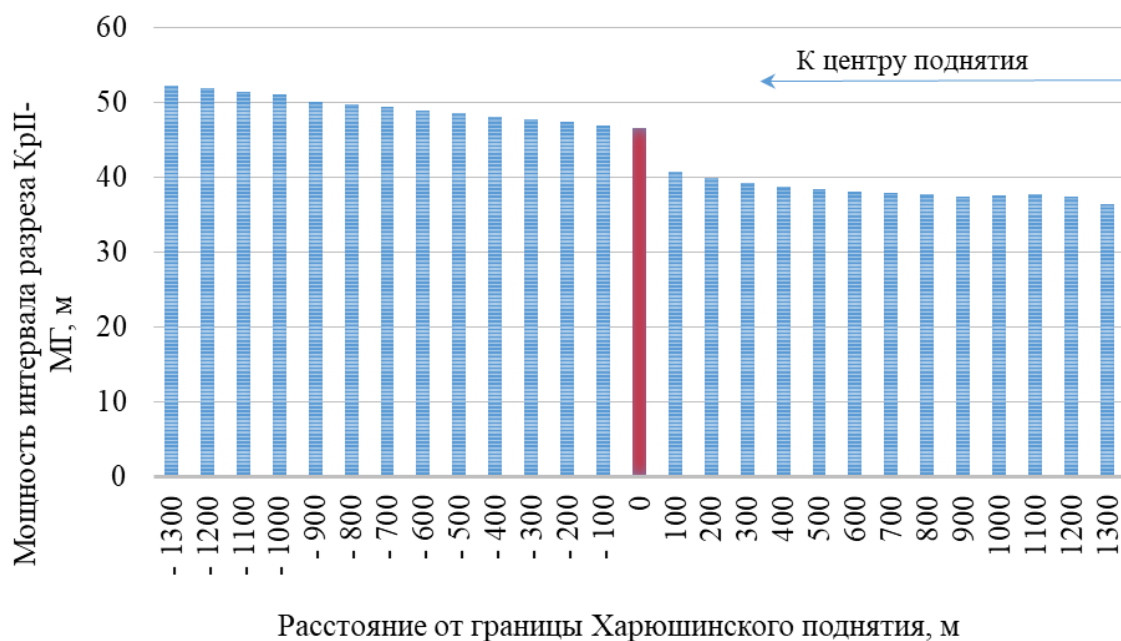
Последний заключается в построении в районе поднятия карт изопахит двух интервалов: «кровля пласта КрII – кровля МГ», «кровля пласта КрII – кровля пласта Е» и сопоставлении средней мощности по каждому из полученных интервалов между базовой площадью поднятия, и площадями уменьшенными и увеличенными относительно исходной с шагом в 100 м. Исходными данными служат абсолютные отметки кровли пластов/слоев, установленные в результате бурения поверхностных и подземных скважин вокруг и в пределах Харюшинского поднятия с захватом участка исследования.

Как видно из данных таблицы 4, связь между границами пластов, слоев и толщ весьма тесная – коэффициент корреляции колеблется от 0,8494 до 0,9997. Это позволяет при достраивании оставшихся поверхностей (кровли пластов/слоев) принять их геометрию в соответствии с положением пласта, несколько генерализуя ее для недостающих пластов с выполаживанием вверх по разрезу. Последнее обусловлено относительно скудными данными о внутренней тектонике в вышележащих структурных комплексах соляной толщи, и сделано для отражения общих черт строения залежи. Для проведения исследований по корреляции основных литологических границ между скважинами использовалась выборка из 70 поверхностных скважин и более 400 подземных скважин в пределах Харюшинского поднятия.

Таблица 4 – Корреляционная матрица абсолютных отметок кровли основных структурных поверхностей

Пласт	МГ	КрП	АБ	В	Г	Д	Е	ПКС	СМТ
МГ	1	-	-	-	-	-	-	-	-
КрП	0,9913	1	-	-	-	-	-	-	-
АБ	0,9871	0,9994	1	-	-	-	-	-	-
В	0,9792	0,9988	0,9997	1	-	-	-	-	-
Г	0,9743	0,9956	0,9974	0,9984	1	-	-	-	-
Д	0,9590	0,9832	0,9867	0,9914	0,9974	1	-	-	-
Е	0,9465	0,9736	0,9777	0,9840	0,9929	0,9974	1	-	-
ПКС	0,9177	0,9548	0,9608	0,9719	0,9856	0,9926	0,9974	1	-
СМТ	0,8494	0,8553	0,8623	0,8663	0,9386	0,9464	0,9589	0,9740	1

Анализ интервалов между отдельными «реперными» слоями соляной толщи показывает увеличение их мощности в западном направлении, в сторону сопряжения восточного склона Харюшинского поднятия с приосевой частью Осокинского прогиба (рисунок 89), характеризующегося сгущением солей в виде повышенной складчатости пластов.



а



б

Рисунок 89 – Гистограмма распределения мощностей в районе Харюшинского поднятия для интервалов разреза: а – КрП-МГ, б – КрП-Е (за ноль взят край (начало) поднятия) (по данным автора [69])

Для наглядности ниже представлены гистограммы сопоставления мощности и суммарных средних углов залегания каждого из пластов и их литологического состава по профилю скважин, проходящему вкост Харюшинского поднятия через центральную часть площади исследования

(рисунок 90). На гистограмме видно, что в центре поднятия (скв. 3) отмечаются максимальные значения углов наклона пластов и мощностей, что указывает на увеличение интенсивности складчатости.

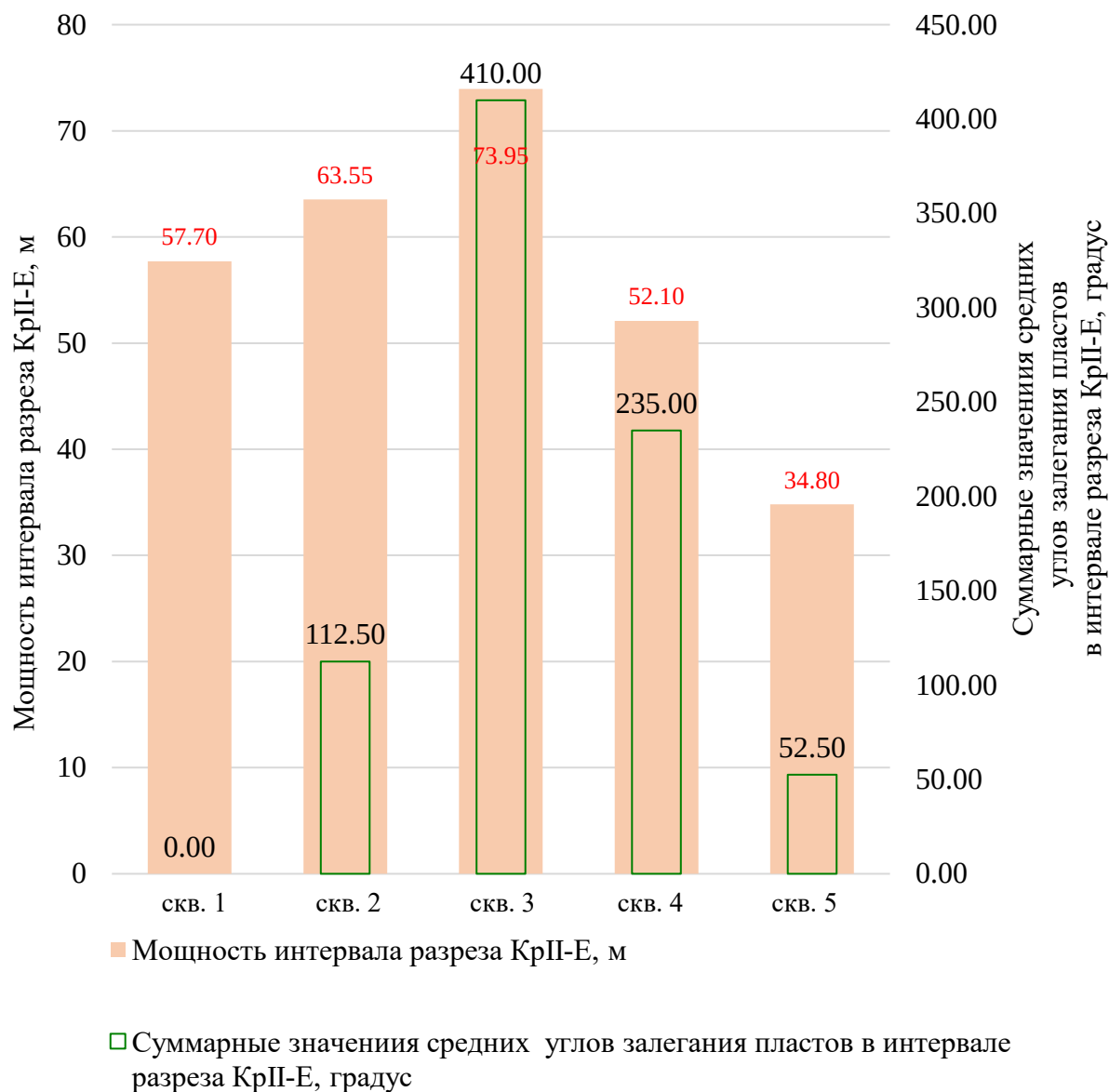


Рисунок 90 – Гистограмма сопоставления мощности и суммарных средних углов залегания пластов в интервале разреза КрII–Е (по данным автора [69])

На гистограммах, отображающих мощности карналлитовой породы и каменной соли видно (рисунок 91), что они увеличиваются к центру поднятия (скв. 3), а мощности сильвинитовых пластов остаются практически неизменными.

При этом следует отметить, что рост мощностей в большей степени проявляется в нижней части ПТС «ИГМ – ПС», соответствующей интервалу пластов КрII–МГ.

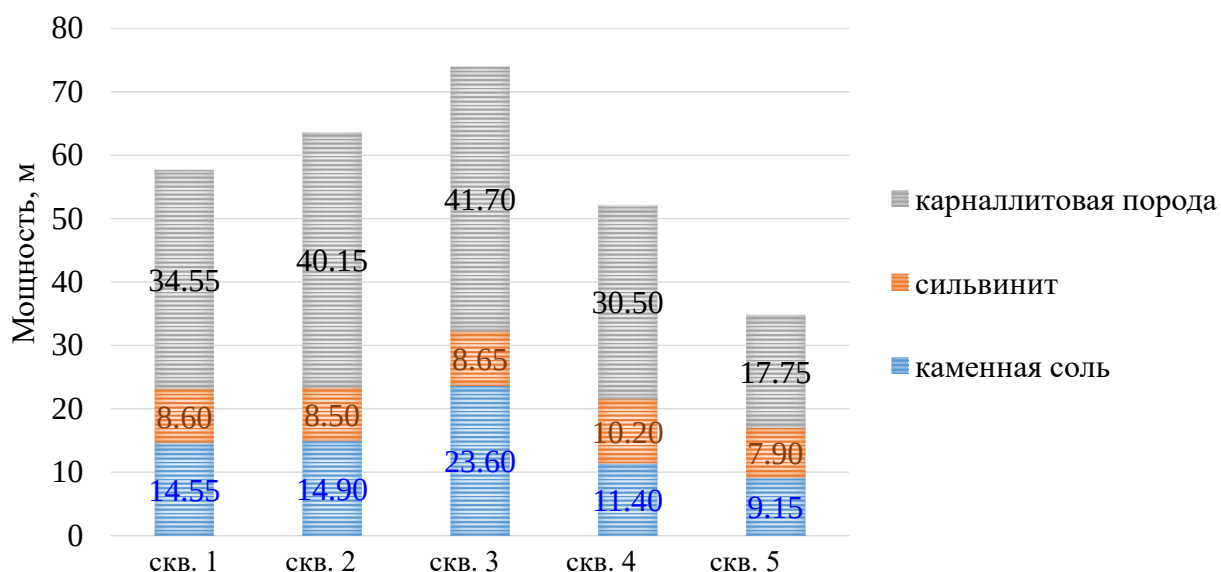


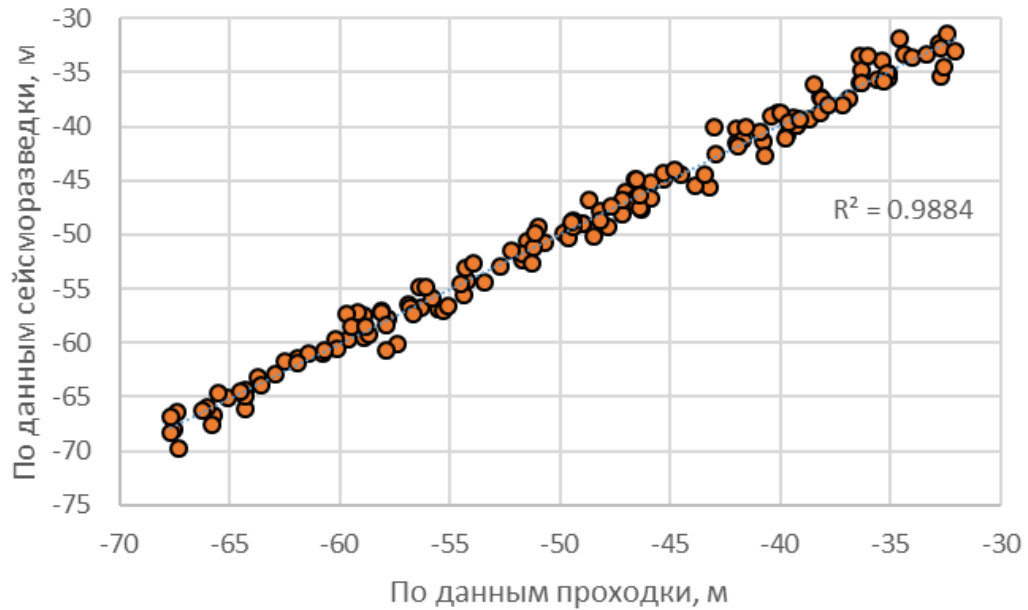
Рисунок 91 – Гистограмма соотношения литологических разновидностей пород в интервале разреза КрII–Е (по данным автора [69])

Все выявленные закономерности учитываются при реализации второго этапа построения инженерно-геологической модели ПТС, что позволяет уже значительно подробней, чем на первом этапе, описать ИГУ, но – *лишь при условии относительно спокойного залегания пластов.*

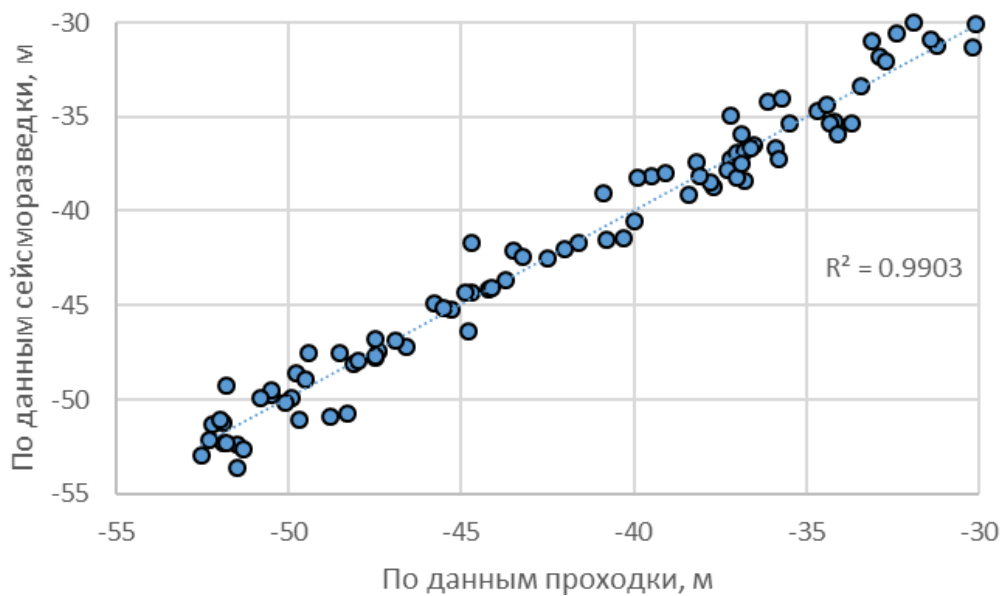
Несмотря на довольно высокую точность моделей, получаемых на втором этапе, на их основе весьма сложно предсказать наличие опасных геологических процессов, если они не вскрыты скважинами или горными выработками. Дальнейшее повышение детальности инженерно-геологических моделей обеспечивает разработанный высокоразрешающий метод шахтной сейсморазведки ПВРО, который привлекается для дальнейшего уточнения ИГУ, в том числе для обнаружения зон замещения, эрозионных врезов, инверсионного рельефа, и определения параметров складчатости (рисунок 88, в).

Точность структурных построений, выполненных по данным шахтной сейсморазведки весьма высока – коэффициент их корреляции с построениями по результатам проходки горных выработок *в условиях отсутствия геологических*

аномалий близок к единице [25] (рисунок 92).



а



б

Рисунок 92 Оценка точности структурных построений инженерно-геологической модели, учитывающей геофизическую модель по данным метода ПВРО: а – для кровли СП, б – для кровли ПКС (по данным автора [69])

Таким образом, на основании геомеханических расчетов для разработанных моделей природно-технических систем, выявленных закономерностей и предложенной стадийности уточнения инженерно-геологических условий, выполняется выявление опасных процессов, связанных с локальными и

региональными неоднородностями (рисунок 93).

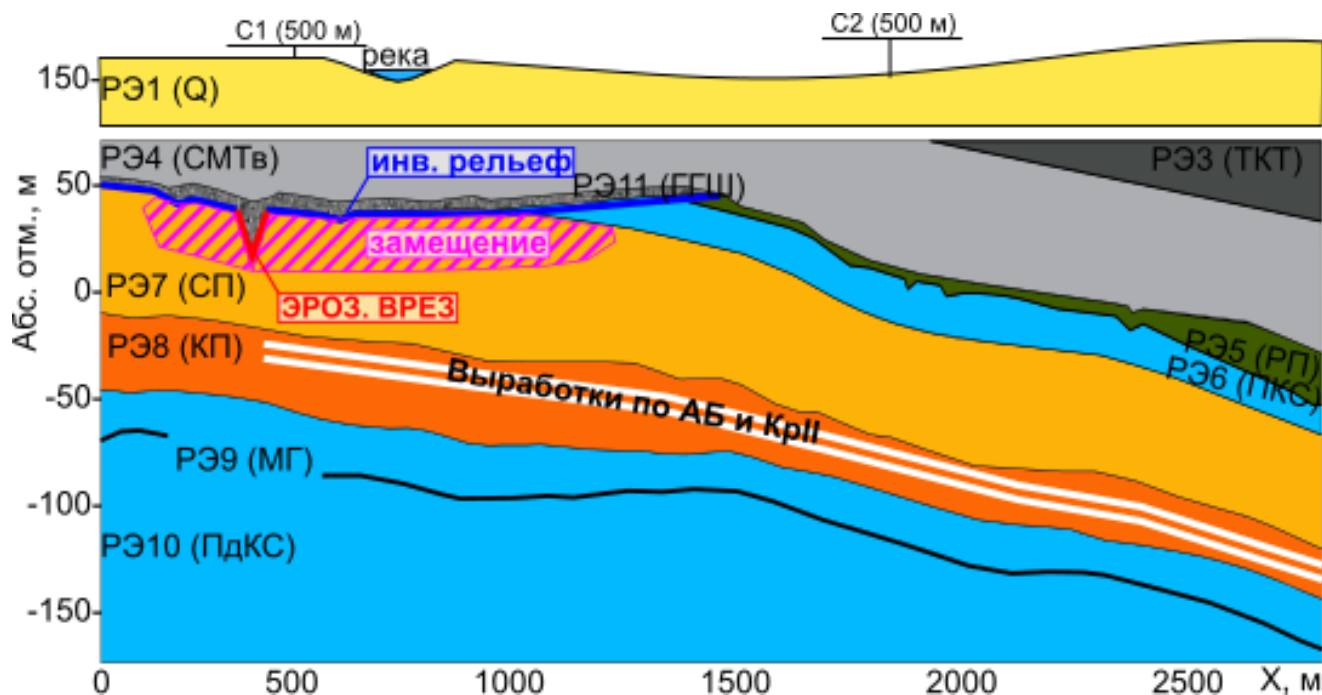


Рисунок 93 – Итоговая инженерно-геологическая модель ПТС с выявленными опасными процессами (по данным автора [214])

В случае, когда есть возможность реализации площадных геофизических исследований, итоговая инженерно-геологическая модель ПТС также может быть представлена в объемном виде, что позволяет более полно отобразить и оценить пространственные закономерности изменения ИГУ (рисунок 94). Так, на указанном рисунке представлена трехмерная инженерно-геологическая модель ПТС для района Харюшинского поднятия, для построения которой на первом этапе использованы около 50 скважин, на втором этапе привлечены данные проходки более 40 км горных выработок, а на третьем – результаты шахтной сейсморазведки методом ПВРО в объеме 30 пог. км. Третий этап построения модели позволил выявить такие явления как эрозионный врез, и обширное замещение карналлитов в верхней части карналлитовой пачки, а также проследить их распространение в разрезе и в плане.

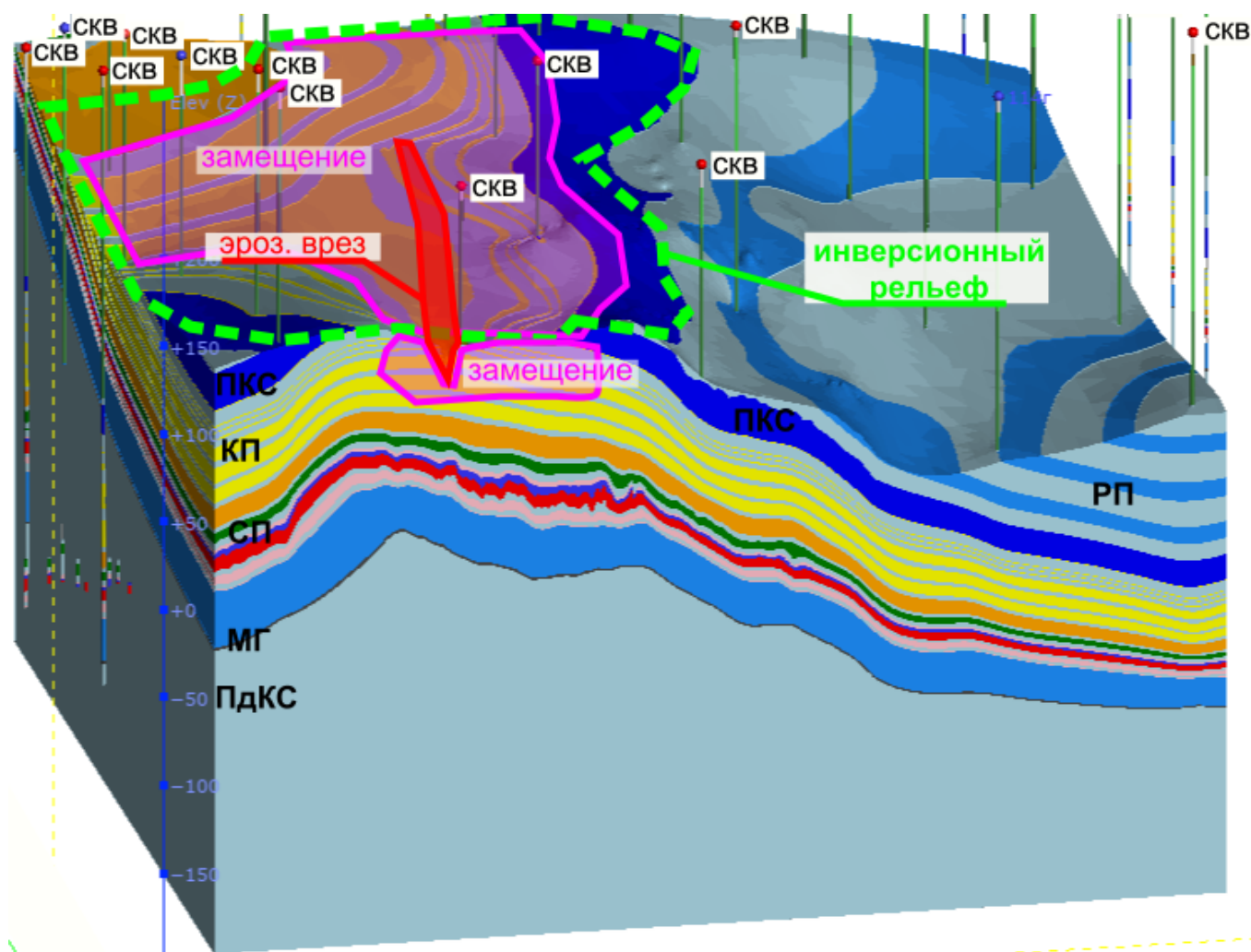


Рисунок 94 – Трехмерная итоговая инженерно-геологическая модель ПТС с выявленными опасными процессами (по данным автора)

Обнаружение эрозионного вреза в районе Харюшинского поднятия привело к необходимости смещения границы аномалии первой группы, выявленной ранее по результатам бурения. Это, в свою очередь явилось основанием для пересмотра проектных решений по строительству подземных сооружений, поскольку геомеханические расчеты, выполняемые согласно действующего на рудниках ВКМС регламента, указали на невозможность обеспечения устойчивости ВЗТ при данных ИГУ. Таким образом, трехстадийная технология построения инженерно-геологической модели ПТС «ИГМ-ПС», предлагаемая автором привела к ценным практическим результатам, повышающим безопасность дальнейшей эксплуатации комплекса подземных сооружений рудника.

Таким образом, разработаны инженерно-геологические модели природно-технических систем соляных месторождений, учитывающие геологическое строение и геоморфологические признаки, и основанные на трехстадийной технологии построения. Модели учитывают геологическое строение, геоморфологические признаки и выделяют структурные элементы по различиям в упругих свойствах горных пород на основе разработанного метода шахтной сейсморазведки ПВРО, что позволило достигнуть значительного повышения детальности и объективности моделей, выявить неизвестные ранее на ВКМС каньонообразные эрозионные врезы, и уточнить другие особенности геологического строения месторождения.

Глава 4. МЕТОДИКА ПРОГНОЗА ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ВОДОЗАЩИТНОЙ ТОЛЩИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Третье защищаемое научное положение. Установлены закономерности распределения инженерно-геологических характеристик разреза – наличия гипсово-глинистой шляпы, угла падения крыльев поднятия, мощности ритмопачек и покрывающей каменной соли, расстояния от оси поднятия, и их связь с риском возникновения опасных геологических процессов в водозащитной толще. С учетом выявленных закономерностей выполнено районирование территории по риску наличия эрозионных врезов и инверсионного рельефа, а также сформирована классификация состояний природно-технической системы по комплексу геолого-геофизических признаков. На этой основе создана формализованная методика анализа инженерно-геологического состояния и прогноза гидрогеологических свойств ВЗТ для повышения безопасности эксплуатации подземных сооружений.

4.1 Районирование ВКМС по рискам возникновения опасных геологических процессов

В ходе анализа условий, сопутствующих ВСД, ЭВ, зонам замещения и инверсионному рельефу, проанализирован банк данных солеразведочных скважин количеством более 1000 штук и геологические разрезы, построенные по данным бурения указанных скважин. В результате выявлен ряд закономерностей структурных характеристик геологического разреза, коррелируемых с наличием опасных процессов в ВЗТ. К выявленным закономерностям относятся: наличие гипсово-глинистой шляпы (ГГШ), наличие поднятия по кровле солей, угол падения крыльев поднятия, мощность ритмопачек (РП), мощность ПКС, наличие понижения рельефа над соляным поднятием [179], расстояние от оси поднятия, наличие замещения верхних карналлитовых пластов (рисунок 95).



Рисунок 95 – Закономерности структурных характеристик геологического разреза, коррелируемые с риском наличия опасных процессов (по данным автора)

С целью формализованного вычисления риска [55, 131–133] наличия на том или ином участке ВКМС инверсного разреза и эрозионных врезов, выявленные закономерности классифицированы с учетом их природы и выражены в виде нормированных признаков наличия опасных процессов соответствующими формулами (таблица 5). Нормирование выполняется к диапазону от 0 до 1, что позволяет в дальнейшем объединить их в единый комплексный признак наличия опасных процессов, или *показатель риска наличия опасных процессов* [49, 64, 115, 260].

Такой комплексный показатель является значительно более надежным [138, 197, 228, 229], чем отдельно взятые закономерности, поскольку учитывает сразу ряд аспектов, связанных с наличием опасных процессов, и поэтому может выступать в качестве основы для дальнейшего районирования ВКМС по риску возникновения опасных процессов еще до проведения детализационных геологоразведочных работ.

Таблица 5 – Нормированные признаки наличия опасных процессов для условий ВКМС

Таксон	Признак	Формула
Литологический	Наличие ГГШ	$P_{\Gamma} = \begin{cases} 1, & M_{\Gamma} > 0 \\ 0, & M_{\Gamma} = 0 \end{cases}$
	Наличие замещения карналлитов	$P_3 = \begin{cases} 1, & M_3 > 0 \\ 0, & M_3 = 0 \end{cases}$
Структурный	Наличие поднятия по кровле солей	$P_A = \begin{cases} 1, & \text{антиклиналь} \\ 0.5, & \text{склон} \\ 0, & \text{синклиналь} \end{cases}$
	Угол падения крыльев поднятия	$P_{\alpha} = \frac{\alpha}{\alpha_{\text{макс}}};$ $\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{L_c}{H_c} \right)$
	Мощность РП	$P_{\text{рп}} = 1 - \frac{H_{\text{рп}}}{H_{\text{рп_макс}}}$
	Мощность ПКС	$P_{\text{пкс}} = 1 - \frac{H_{\text{пкс}}}{H_{\text{пкс_макс}}}$
Морфологический	Расстояние от оси поднятия	$P_P = 1 - \frac{L}{L_{\text{макс}}}$

Таксон	Признак	Формула
	Понижение рельефа	$P_{\Pi} = \begin{cases} 1, & \text{понижение} \\ 0.5, & \text{склон} \\ 0, & \text{поднятия} \end{cases}$

где M_{Γ} – мощность ГГШ, L_c – длина участка крыла поднятия, H_c – перепад высот участка крыла поднятия, H_{rp} – мощность ритмопачек, H_{rp_max} – максимальная мощность ритмопачек, $H_{пкс}$ – мощность ПКС, $H_{пкс_max}$ – максимальная мощность ПКС, L – расстояние от оси поднятия, L_{max} – максимальное расстояние от оси поднятия, M_z – мощность зоны замещения карналлитов.

Ряд рассматриваемых признаков имеют «триггерный» характер, то есть принимают значения только 0 или 1, таким образом они изначально являются нормированными. К ним относятся такие признаки, как наличие глинисто-гипсовой шляпы и наличие замещенных карналлитов. Также выделено два других, изначально нормированных признака, которые, однако, могут занимать и третье, промежуточное значение, равное 0.5, к ним относятся признаки наличия поднятия по кровле солей и понижения рельефа земной поверхности. Остальные признаки нормируются делением текущего значения параметра на максимально возможный, к таким признакам относятся угол падения крыльев поднятия, мощность ритмопачек, мощность пласта покровной каменной соли и расстояние от оси ближайшего поднятия.

Рассмотрим природу отдельных выявленных закономерностей структурных характеристик геологического разреза, связанных с наличием опасных процессов в ВЗТ.

Наличие глинисто-гипсовой шляпы – данное явление связано с выщелачиванием легкорастворимых солей в кровле соляного поднятия [150]. В основном речь идет о слоях каменной соли, залегающих в интервале ритмопачек, но также могут подвергнуться растворению и каменная соль, слагающая пласт покровной каменной соли, карналлит, слагающий карналлитовую пачку. После завершения растворения каменной соли на месте описываемых процессов формируется собственно глинисто-гипсовая шляпа, сложенная так называемым нерастворимым остатком, ранее входящим в ритмопачки в виде прослоев мергеля и глин. То есть глинисто-гипсовая шляпа является маркером того, что в данной точке геологического разреза уже достаточно давно, в геологическом понимании, сложились ИГУ, способствующие формированию инверсионного рельефа в своде соляного поднятия. В числе таких ИГУ вполне вероятно могли входить и трещины

отрыва в своде соляного поднятия.

Наличие поднятий, прослеживаемых по кровле солей. В результате тектонических процессов, происходящих на месторождениях солей, на поверхности солей могут возникать купола либо впадины (прогибы) [309]. Вне зависимости от причин возникновения соляных куполов, на их сводах резко активизируются процессы выщелачивания солей ввиду интенсивного воздействия на них подземных вод. Активизация воздействия обуславливается тем, что минерализованные подземные воды плотнее, чем пресные, и поэтому мигрируют вниз по разрезу, а пресные наоборот вверх. Иначе говоря, создаются условия для уменьшения минерализации подземных вод, и, соответственно, для повышения их растворяющей способности по отношению к солям на сводах соляных поднятий. Кроме того, как было показано во втором защищаемом положении, на сводах соляных куполов создаются условия, приводящие к нарушению сплошности слоев соли в виде трещин отрыва, что, в свою очередь, способствует еще большему проникновению слабоминерализованных, и поэтому обладающих высокой растворяющей способностью рассолов внутрь соляной залежи, и еще более интенсивному ее растворению. Таким образом, данный признак указывает на высокую вероятность активизации в рассматриваемой точке процессов растворения солей и возникновения эрозионных врезов.

Мощность покровной каменной соли, и мощность ритмопачек. На участках спокойного субгоризонтального залегания пластов на ВКМС мощность отдельных пластов соли изменяется слабо, и бывает выдержанной на протяжении многих километров. Поэтому, в случае, когда мощность покровной каменной соли и ритмопачек, а также количество последних уменьшается по отношению к соседним участкам, это косвенно указывает на активное течение здесь процессов выщелачивания солей, которое, в свою очередь может быть сопряжено с трещинами отрыва в кровле поднятий.

Наличие замещения карналлитов. Замещение карналлитов происходит при воздействии на них подземных вод различной минерализации. Подземные воды могут достичь карналлитов лишь при условии нарушения сплошности залегающих выше водонепроницаемых пластов каменной соли из состава ритмопачек или покровной каменной соли. Таким образом, наличие замещений в карналлитовой пачке косвенно указывает на нарушение сплошности солей и активное течение постседиментационных процессов. Нарушение сплошности может быть вызвано

трещинами отрыва, возникающими в сводах соляных поднятий, и дальнейшим растворением залегающих там слоев солей.

Угол падения крыльев соляных поднятий (куполов). Активность выщелачивания на куполе соляного поднятия прямо пропорционально зависит от крутизны падения его крыльев, таким образом, данная характеристика указывает на вероятность протекания опасных процессов в пределах выявленного купола. Так же напрямую от крутизны падения крыльев поднятия зависит и возможность образования трещин отрыва в своде поднятия, которые далее прорабатываются до эрозионных врезов и инверсионного рельефа.

Расстояние от свода (оси) соляного поднятия. Данная характеристика указывает на активность протекания процессов растворения и выщелачивания в зависимости от расстояния от оси поднятия – чем ближе к оси, тем ниже минерализация подземных вод и выше активность процессов растворения. Кроме того, чем ближе к оси поднятия, тем выше вероятность возникновения трещин отрыва, с последующим растворением их до состояния эрозионных врезов и инверсионного рельефа.

Наличие понижения в рельефе дневной поверхности. В случае активного протекания процессов растворения солей в своде поднятия и выщелачивания значительных объемов галита, происходит оседание вышележащих ИГЭ, с формированием понижения в рельефе земли. Ось отрицательных структур поверхности земли может не совпадать в точности с осью соляного поднятия, но тяготеет к нему, и поэтому может служить достаточно надежным маркером проходящих здесь опасных процессов.

Сочетание рассмотренных нормированных признаков, связанных с независимыми друг от друга характеристиками геологического разреза, позволяет на основе их комплексирования повысить объективность оценки ИГУ и выполнить районирование по риску наличия опасных процессов. Поскольку дифференциальные признаки уже нормированы к одному диапазону, комплексная величина, или, иначе говоря, итоговый показатель риска наличия опасных процессов может быть рассчитан как среднее арифметическое по всем используемым признакам. В случае же наличия гипсово-глинистой шляпы, которая является результатом растворения значительных объемов солей, для установления факта наличия опасных процессов достаточно одного этого признака.

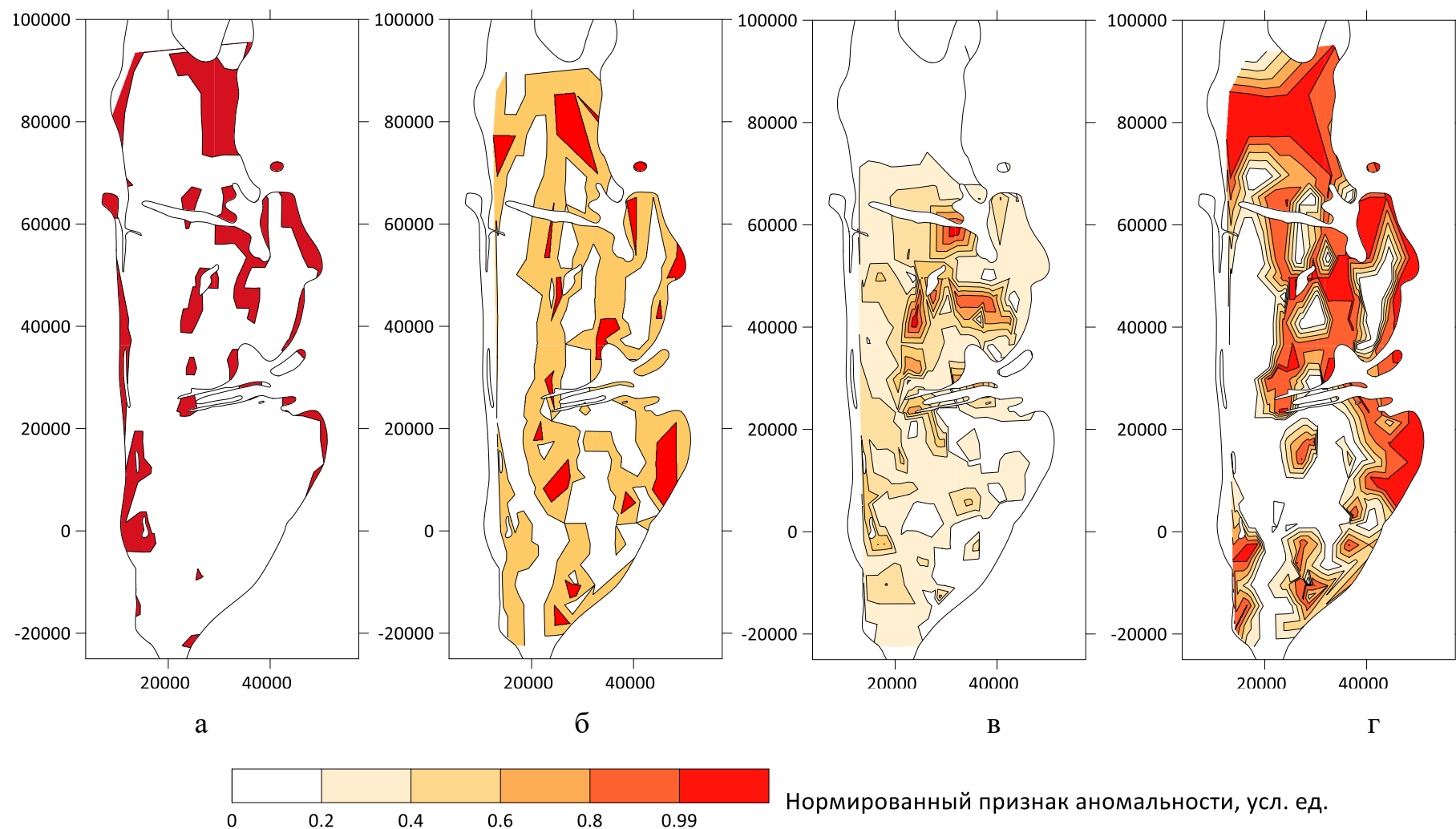


Рисунок 96 – Карты нормированных дифференциальных признаков наличия опасных процессов для ВКМС: а – наличие ГГШ, б – наличие поднятия по кровле солей, в – углы наклона крыльев поднятий, г – мощность ритмопачек (по данным автора)

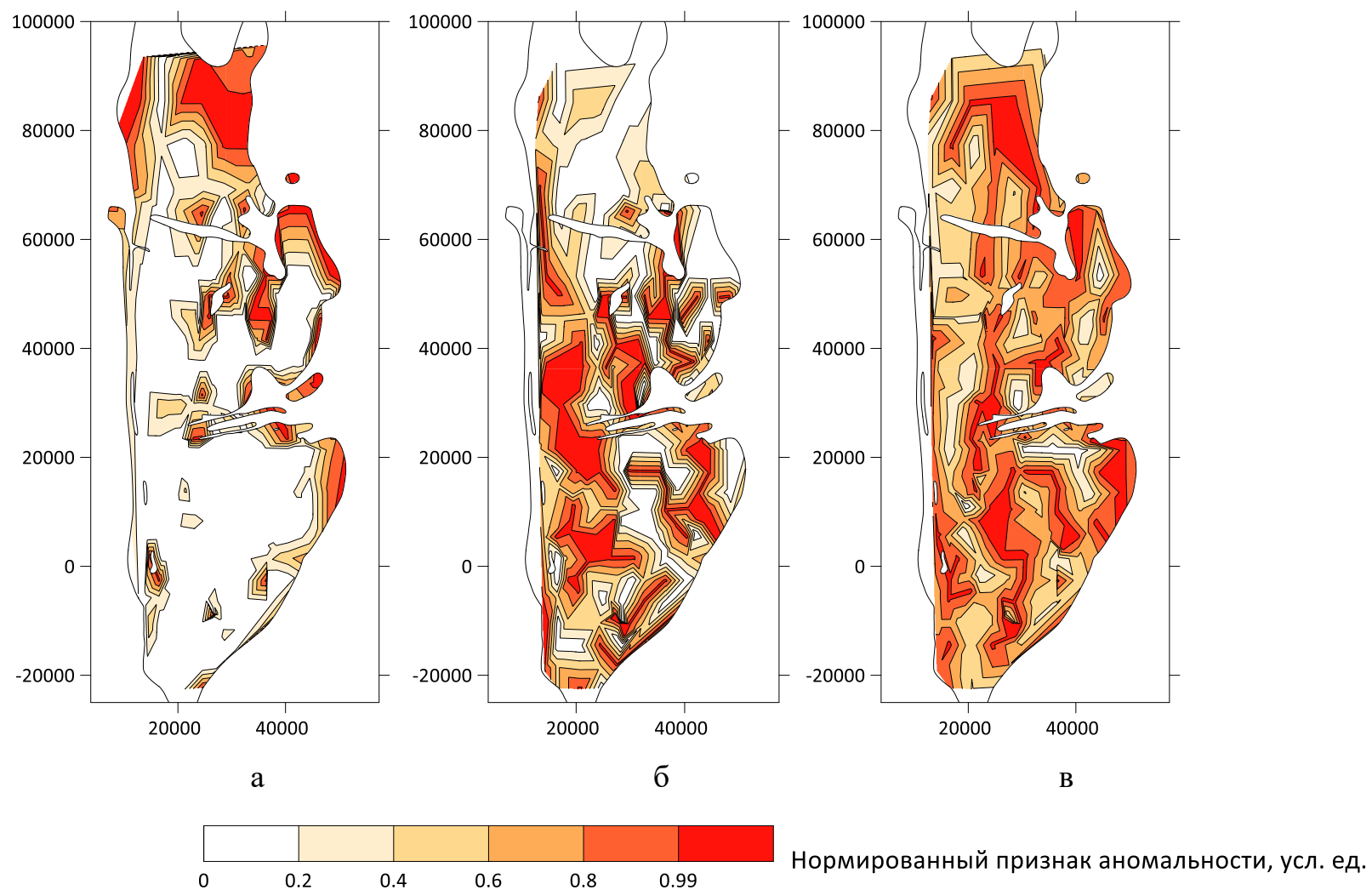


Рисунок 97 – Карты нормированных дифференциальных признаков наличия опасных процессов для ВКМС а – мощность ПКС, б – наличие понижения рельефа земной поверхности, в – расстояние от оси поднятия (по данным автора)

Таким образом, итоговый показатель риска наличия опасных процессов вычисляется по формуле [216]:

$$P = \begin{cases} 1, & P_{\Gamma} = 1 \\ \frac{\sum_{i=1}^N P_i}{N}, & P_{\Gamma} = 0 \end{cases}, \quad (30)$$

где P_i – один из нормированных геологических признаков наличия опасных процессов согласно таблице 2, N – количество нормированных геологических признаков.

Для районирования ВКМС по риску наличия опасных геологических процессов, проанализирован весь доступный объем поверхностных скважин, пробуренных для разведки ВКМС, которых насчитывается более 1000 штук. В окрестностях каждой из скважин согласно приведенным формулам вычислены соответствующие нормированные признаки, с учетом которых по формуле (30) далее рассчитан итоговый показатель P – риск наличия опасных процессов. Полученные данные позволили выполнить районирование ВКМС по риску наличия инверсионного разреза и эрозионных врезов, результаты районирования представлены в виде карты, на которой области с низкими значениями указывают на отсутствие риска наличия опасных процессов, а области с максимальными значениями на максимальный риск (рисунок 98).

На представленной карте районирования видно, что области с максимальным риском наличия опасных процессов тяготеют к краевым и северной частям месторождения. Также можно отметить, что северо-восточная часть месторождения является наиболее аномальной с рассматриваемой точки зрения, чем остальная площадь ВКМС. Данная карта позволяет определить области, в пределах которых проведение детализационных геологоразведочных работ для подтверждения или исключения наличия опасных процессов необходимо в обязательном порядке, а также области, где риск наличия опасных процессов минимален, и необходимость проведения детализационных работ определяется по усмотрению недропользователя.

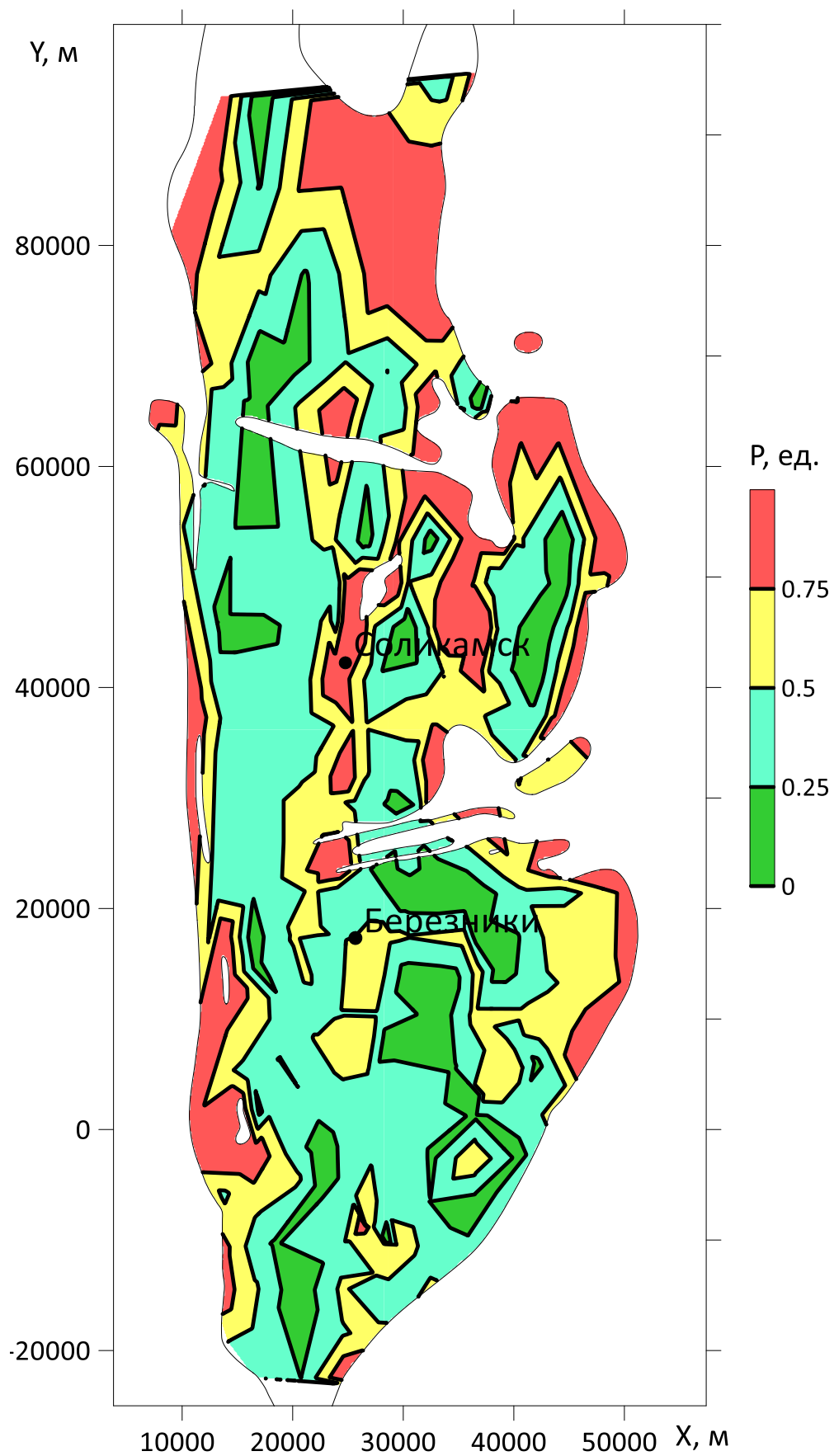


Рисунок 98 – Карта районирования ВКМС по рискам возникновения опасных геологических процессов (по данным автора)

4.2 Разработка классификации состояния ПТС «инженерно-геологический массив – подземное сооружение» на основе геологических и горнотехнических параметров

Полученные сведения о риске возникновения опасных процессов являются предпосылкой к разработке классификации состояния ПТС для ранжирования участков строительства подземных сооружений по условиям устойчивости ПТС. Очевидно, что помимо учета инженерно-геологических условий и риска возникновения опасных процессов, такая классификация должна включать в себя и решающие горнотехнические факторы, такие как степень нагружения целиков, мощность водозащитной толщи и наличие в ней аномалий по данным бурения и проходки, а также поступление флюидов в подземные сооружения (горные выработки).

Степень нагружения целиков. При камерных системах разработки (этажно-камерная, камерно-столбовая и другие) в процессе строительства подземных сооружений формируются целики различного назначения: междукамерные, межпанельные, потолочные и другие [77, 82, 117, 286]. Общее назначение их — создание подземной пространственной конструкции, обеспечивающей сохранение комплекса подземных сооружений. Целики представляют собой несущие элементы указанной пространственной конструкции и, следовательно, должны отвечать определенным прочностным требованиям [18-21].

Наиболее ответственными в указанной системе являются междукамерные целики [20-21]. При этажно-камерной системе разработки междукамерные целики имеют форму параллелепипедов и известны под названием ленточные. При эксплуатации важен наименьший их размер, называемый шириной, которая и определяется расчетом.

При выборе мест расположения, ориентировки осей междукамерных целиков в пространстве и методов расчета их размеров прежде всего учитывают условия залегания рудной залежи, особенно угол наклона ее к горизонту. По этому признаку с точки зрения решения рассматриваемой задачи выделяют методы расчета междукамерных целиков для условий рудных тел горизонтального и пологого залегания и для наклонного залегания и крутопадающих.

При расчете размеров опорных междукамерных целиков важное значение имеет правильное определение нагрузки на них [158, 169]. В зависимости от горно-геологических условий нагрузка на опорные целики формируется по-разному.

Принципиальное значение имеет соотношение проекции залежи на горизонтальную плоскость L и глубины разработки H . Статистически установлено, что при $L/H \geq 1$ на опорные целики формируется нагрузка от полной массы налегающих пород до земной поверхности [110, 118–120, 184, 271]. В этом случае при отработке горизонтальных и пологозалегающих месторождений, к которым относится и Верхнекамское месторождение солей, согласно гипотезе Турнера–Шевякова, должно соблюдаться условие прочности:

$$SH\gamma_M + S_{\text{ц}}H\gamma_{\text{ц}} \leq S_{\text{к}}\sigma_{\text{сж}}, \quad (31)$$

где S — площадь выработанного пространства, приходящаяся на один целик, м^2 ; H — глубина от земной поверхности до кровли камеры, м ; γ_M — плотность (средняя) пород вышележащего массива, $\text{т}/\text{м}^3$; $S_{\text{ц}}$ — площадь горизонтального сечения опорного целика, м^2 ; $\gamma_{\text{ц}}$ — плотность пород целика, $\text{т}/\text{м}^3$; $\sigma_{\text{сж}}$ — предел прочности пород целика при сжатии, $\text{т}/\text{м}^2$.

В условиях полной подработки, надлежащем подборе коэффициентов, корректирующих прочность целиков, метод Турнера–Шевякова обеспечивает удовлетворительное качество практических расчетов и с успехом уже много лет применяется в мировой горной практике [20, 32, 277, 318]. На рудниках Верхнекамского месторождения солей расчет степени нагружения ленточных междукammerных целиков (C) базируется именно на методике Турнера–Шевякова, которая в действующем технологическом регламенте [282, 283] определяется следующим соотношением:

$$C = \xi\gamma H_0 \frac{a+b}{bk_f\sigma_m}, \quad (32)$$

где ξ — коэффициент, учитывающий изменение нагрузки на целики вследствие влияния различных горнотехнических факторов (пригрузка от солеотвалов, опорное давление, наличие межходовых целиков и др.); γ — объемный вес пород; H_0 — максимальное значение расстояния от земной поверхности до кровли целиков; a — ширина очистных камер; b — ширина междукammerных целиков; k_f — коэффициент формы целиков; σ_m — агрегатная прочность пород в массиве, которая вычисляется на основе эквивалентной прочности пород, слагающих целики, с использованием нескольких коэффициентов, определяющих усредненное влияние особенностей их строения и состояния (наличие масштабного фактора, глинистых прослоек, увлажнения пород и т.п.)

Таким образом, нагрузка на целики определяется весом всей налегающей

породной толщи, а их несущая способность зависит от формы целика (отношение высоты к ширине), прочности пород и ряда структурных геологических факторов, характерных для конкретных месторождений [21, 72, 184, 316, 321]. Нормативными документами на соляных рудниках степень нагружения междокамерных целиков регламентируется и обычно не превышает 0,5, что соответствует коэффициенту запаса несущей способности более 2, однако в большинстве случаев из соображений безопасности степень нагружения принимается еще меньшей, как правило не более 0,3. Увеличение степени нагружения целиков повышает риски прорыва пресных вод в подземные сооружения и их потери [31], то есть приводит к повышению уровня техногенной нагрузки на подработанную территорию [19]. В рамках настоящей работы будут использоваться проектные величины степени нагружения.

Мощность водозащитной толщи является одним из важнейших факторов, влияющих на безопасность строительства и эксплуатации подземных сооружений на месторождениях солей [29, 275]. В частности, в общих положениях документов [205, 282, 283], регламентирующих мероприятия по защите рудников от затопления на месторождениях солей, указывается, что выбор мер защиты комплексов подземных сооружений рудников от затопления необходимо выполнять с учетом строения водозащитной толщи, которое, среди прочего определяется:

- количеством слоев каменной соли в водозащитной толще;
- мощностью отдельных слоев каменной соли и расстоянием до этих слоев от кровли верхнего отрабатываемого пласта;
- наличием особенностей (аномалий) в строении пород водозащитной толщи;
- минимально допустимой суммарной мощности ненарушенных слоев каменной соли.

Основным критерием безопасной подработки водозащитной толщи является требование, в соответствии с которым суммарная мощность отдельных ненарушенных слоев каменной соли больше или равна их минимально допустимой суммарной мощности:

$$M_S \geq [M], \quad (33)$$

где M_S – суммарная мощность слоев (пластов) каменной соли, в которых при деформировании толщи пород не возникают техногенные субвертикальные

трещины, $[M]$ – минимально допустимая суммарная мощность ненарушенных слоев (пластов) каменной соли водозащитной толщи.

На участках с нормальным строением водозащитной толщи и на участках распространения и влияния аномальных зон четвертой группы минимально допустимая суммарная мощность ненарушенных слоев каменной соли $[M]$ принята равной 10 метров. На участках распространения и влияния аномальных зон второй или третьей группы минимально допустимая суммарная мощность ненарушенных слоев каменной соли $[M]$ принята равной 20 метров. При этом суммарная мощность ненарушенных слоев каменной соли водозащитной толщи определяется по формуле:

$$M_S = \sum_{j=1}^k m_j, \quad (34)$$

где m_j – мощность j -го слоя каменной соли, в котором при деформировании водозащитной толщи не возникают трещины разрыва, $j = 1, 2, 3, \dots, k$, k – количество ненарушенных слоев каменной соли водозащитной толщи.

Аномальные зоны в водозащитной толще, согласно нормативной документации [282, 283], разделяются по степени опасности их подработки на следующие группы:

- аномальные зоны, при наличии которых не допускается «сплошного» строительства подземных сооружений, возможна лишь проходка единичных выработок (первая группа аномальных зон);

- аномальные зоны, при наличии которых возможно строительство подземных сооружений только в одном сильвинитовом пласте, при нормативной степени нагружения междукammerных целиков $[C] = 0.3$, и минимально допустимой суммарной мощности ненарушенных слоев каменной соли в водозащитной толще $[M] = 20$ метров (вторая группа аномальных зон);

- аномальные зоны, при наличии которых допускается строительство подземных сооружений по двум сильвинитовым пластам при нормативной степени нагружения междукammerных целиков $[C] = 0.30$ и минимально допустимой суммарной мощности ненарушенных слоев каменной соли в водозащитной толще $[M] = 20$ м (третья группа аномальных зон);

- аномальные зоны, при наличии которых допускается строительство подземных сооружений по трем сильвинитовым пластам при значениях нормативной степени нагружения междукammerных целиков $[C] = 0.30$ и

минимально допустимой суммарной мощности ненарушенных слоев каменной соли в водозащитной толще $[M] = 10$ м (четвертая группа аномальных зон).

Поступление флюидов в выработки – очевидный и явный признак либо аномального строения, либо нарушения целостности водозащитной толщи. Устанавливается прямым наблюдением по мере строительства подземных сооружений. Критическую роль играют дебит, или скорость поступления флюидов в выработки, и уровень их минерализации. В случае, если указанные факторы позволяют принять меры для прекращения поступления флюидов в подземные сооружения, состояние природно-технической системы «инженерно-геологический массив – подземные сооружения» временно можно признать неустойчивым. При полном прекращении притока флюидов либо благодаря естественным причинам, либо в силу принятых горнотехнических мер, природно-техническая система возвращается в устойчивое состояние до тех пор, пока приток отсутствует либо пренебрежимо мал.

Таким образом, на основе выявленных закономерностей структурных характеристик геологического разреза, связанных с наличием опасных процессов в ВЗТ, разработана классификация состояния ПТС (таблица 5), которая дает возможность ранжировать участки ведения горных работ по условиям устойчивости ПТС. Разработанная классификация играет важную роль в повышении безопасности строительства и эксплуатации подземных сооружений и устойчивости ПТС в условиях подземной разработки соляных месторождений, однако она не обладает всей полнотой объективности, так как в ней учтены только выявленные закономерности структурных характеристик геологического разреза, связанных с наличием опасных процессов, и результаты буровых и горнопроходческих работ.

Таблица 5 – Классификация состояния ПТС «инженерно-геологический массив – подземное сооружение» на основе геологических и горнотехнических параметров

Условия устойчивости ПТС	Состояние природно-технической системы		
	1 – устойчивое	2 – неустойчивое	3 – критическое
Риск наличия опасных процессов в ВЗТ	$P < 0.5$	$0.75 > P > 0.5$	$P > 0.75$
Аномалии в ВЗТ по данным бурения и проходки	Отсутствуют, либо 4 группы	Косвенные признаки разломов, сухие трещины, зоны замещения, аномалия 2 или 3 группы	Разломы, трещины с течью рассолов, обширные зоны замещения, отсутствие ПКС аномалия 1 группы
Мощность ВЗТ по данным бурения, сетка 2 на 2 км	Мощность ненарушенных слоев КС в ВЗТ > 10 м	Мощность ненарушенных слоев КС в ВЗТ $= 20$ м	Мощность ненарушенных слоев КС в ВЗТ < 20 м
Степень нагружения целиков	Степень нагружения < 0.3	Степень нагружения $= 0.3$	Степень нагружения > 0.3
Поступление флюидов в выработки	Отсутствует	Приток насыщенных флюидов	Приток ненасыщенных флюидов

4.3 Оценка физического состояния ПТС с учетом геолого-геофизических признаков

Следующим этапом исследований являлось расширение разработанной классификации с учетом возможностей геофизических методов и построение карты районирования ВКМС по состоянию ПТС «инженерно-геологический массив – подземные сооружения». Возможности шахтной сейсморазведки в модификации метода ПВРО для уточнения инженерно-геологических условий весьма широки, с ее помощью можно обнаружить и изучить участки наличия опасных процессов, не

установленные ранее другими известными способами и методами, включая геофизические.

Так, на одном из участков Верхнекамского месторождения солей, с помощью метода шахтной сейсморазведки на поперечных волнах с разделением отражений обнаружен участок резкого погружения кровли солей (соляного зеркала) (рисунок 99). В правой части геофизической модели в интервале пикетов 0–100 м отмечаются все основные расчетные элементы, свойственные ПТС «инженерно-геологический массив – подземные сооружения» на ВКМС – ритмопачки из нижней части соляно-мергельной толщи, покровная каменная соль, карналлитовая и сильвинитовая пачки, подстилающая каменная соль с маркирующей глиной в верхней ее части.

Однако, соляное зеркало, ассоциируемое в правой части геофизической модели с кровлей покровной каменной соли, после пикета 100 начинает резко погружаться в направлении увеличения пикетов. По мере погружения соляного зеркала к пикету 300 м в разрезе исчезает покровная каменная соль, далее, к пикету 700 практически исчезает карналлитовая пачка, а выработка по пласту АБ почти достигает соляного зеркала.

Данные инженерно-геологические условия, угрожающие быстрым затоплением всему комплексу подземных сооружений, не были установлены ни одним из доступных способов, включая бурение наземных и подземных скважин, проходку горных выработок и геофизические работы по стандартным методикам (наземную и подземную электроразведку и сейсморазведку).

Согласно геологическим моделям, формируемым до выполнения здесь шахтной сейсморазведки ПВРО, рассматриваемому участку приписывался полный разрез водозащитной толщи, мощность которой на данном участке оценивалась в 60-70 метров, хотя и предполагалось наличие глинисто-гипсовой шляпы [298]. В результате при строительстве очередного подземного сооружения в него начали поступать рассолы, остановить которые удалось лишь путем строительства гидроизолирующей перемычки.

Позднее, постфактум, было установлено, что рассолы, поступающие в подземные сооружения, имеют надсолевую природу [30, 256, 257], что подтверждает выводы, полученные с помощью шахтной сейсморазведки методом ПВРО. Обнаруженные шахтной сейсморазведкой масштабы растворения соляной

толщи, гигантские по меркам размеров подземных сооружений как по горизонтали, так и по вертикали, оказали серьезное воздействие на специалистов, связанных на ВКМС с геологоразведкой и строительством подземных сооружений, поскольку это было первое высоко детальное изображение инженерно-геологических условий, включающих в себя столь масштабный участок инверсионного рельефа и эрозионных врезов. Стало очевидным, что необходимо внедрение новых технологий, позволяющих получить более обширную и детальную информацию при изучении инженерно-геологических условий на Верхнекамском месторождении солей, чем стандартные подходы.

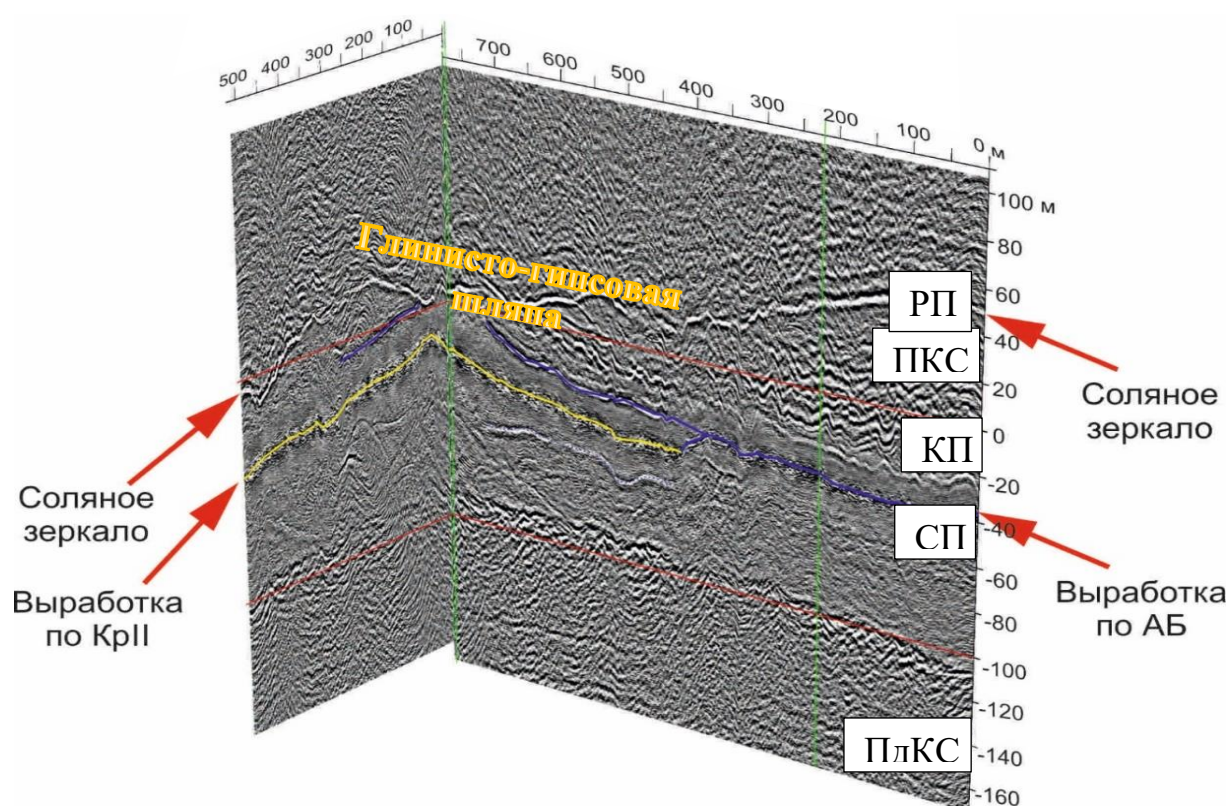


Рисунок 99 – Геофизическая модель с обширным участком инверсионного рельефа (по данным автора)

Таким образом, на данном примере показано, что во-первых, несмотря на выполнение формальных требований к методикам проведения геологоразведочных работ и инженерно-геологических изысканий, остается весьма высокой вероятность ошибочной оценки инженерно-геологических условий и не обнаружения масштабнейших участков опасных процессов, несущих угрозу устойчивости ПТС из-за потери подземных сооружений, и, во-вторых, достигнута

высокая, не свойственная традиционным геофизическим методикам, информативность геофизических и инженерно-геологических моделей, построенных с учетом данных шахтной сейсморазведки методом ПВРО. Отсюда можно сделать вывод о том, что существует острая необходимость внедрения в практику инженерных изысканий при проектировании и строительстве подземных сооружений новых информативных методов и методик геофизических исследований [314, 323, 324].

Несмотря на широкие базовые возможности метода шахтной сейсморазведки ПВРО, их также может оказаться недостаточно в случае сложных инженерно-геологических условий для формирования объективных инженерно-геологических моделей. Расширение возможностей метода возможно за счет использования методик обнаружения информации, скрытой от прямого наблюдения специалистами.

В сейсморазведке существует два базовых подхода к интерпретации получаемых данных – кинематический и динамический [34, 122]. Кинематический подход подразумевает прослеживание явных отражающих горизонтов, оценка скоростной модели и построение геофизической модели среды в виде отражающих границ, соответствующих определенным геологическим границам [210]. Данный подход использован и при построении геофизических моделей, описанном в Главе 2 данной работы. Основной параметр, который позволяет оценить в рассматриваемом аспекте кинематический подход в шахтной сейсморазведке методом ПВРО – *мощность ВЗТ* (рисунок 84). Данный параметр оценивается путем определения разницы между абсолютной отметкой кровли водозащитной толщи и абсолютной отметкой линии наблюдения в подземной выработке. Кровлей водозащитной толщи при этом считается кровля самого верхнего по разрезу слоя соли, выделяемого шахтной сейсморазведкой – одной из ритмопачек, покровной каменной соли, карналлитовой пачки.

Второй подход, динамический, иначе называемый *атрибутным анализом* [195, 216, 270, 210], призван выявить такую информацию в сейсмических данных, которая скрыта от «невооруженного» взгляда, но при этом отображает важные закономерности распределения сейсмических характеристик, связанные с инженерно-геологическими условиями в целом и с опасными процессами в частности, а также с морфологическими особенностями залегания горных пород.

Существует большое количество сейсмических атрибутов, при этом большинство из них базируются на трех типах характеристик сигнала – амплитудных, корреляционных и спектральных [25]. Из названия типов характеристик можно понять, что первые описывают особенности пространственного распределения амплитуды записи, вторые – схожесть сигнала, а третьи – особенности спектра в точке анализа.

Амплитудные характеристики позволяют выделить участки сейсмического разреза со скрытыми изменениями интенсивности отражений, которые, в свою очередь, могут быть связаны с определенными особенностями ИГУ, в том числе с опасными процессами. Так, изменение амплитуды отражения может означать смену литологического состава, изменение плотности, пористости, водонасыщенности на границах ИГЭ. В частности, можно предположить, что в области эрозионных врезов отражения от кровли солей должны резко снижать интенсивность или полностью исчезать ввиду выщелачивания последних, переотложения глинисто-гипсового материала и, как следствие, исчезновения границ резкого изменения упругих свойств горных пород. В области же инверсионного рельефа, в случае, когда он достигает ПКС или КП, отражение от кровли солей наоборот должно становиться более интенсивным ввиду контакта рыхлых переотложенных пород и значительно более плотных солей. Рассмотрим основные амплитудные характеристики сигнала (в окне анализа).

Среднее абсолютное значение амплитуды:

$$A_{cp} = \frac{\sum_{d=1}^{N_d} \sum_{tr=1}^{N_{tr}} |A_{d,tr}|}{N_d N_{tr}}, \quad (35)$$

где d – номер дискрета (отсчета) в окне анализа, tr – номер трассы в окне анализа, N_d – количество дискрет в окне анализа, N_{tr} – количество трасс в окне анализа.

Среднеквадратическое значение амплитуды:

$$A_{сркв} = \sqrt{\frac{\sum_{d=1}^{N_d} \sum_{tr=1}^{N_{tr}} A_{d,tr}^2}{N_d N_{tr}}}, \quad (36)$$

Максимальное абсолютное значение:

$$A_{max abs} = \max_{1 \leq d \leq N_d, 1 \leq tr \leq N_{tr}} \{|A_{d,tr}|\}, \quad (37)$$

Спектральных характеристик, ввиду их более сложной природы, существует значительно большее количество, чем амплитудных. Под спектром в геофизике понимается совокупность гармоник сигнала при его разложении по некоторому базису ортогональных функций. Самым распространенным разложением в настоящее время является разложение в ряд Фурье [25, 34]. Ряд Фурье – это ряд, дающий приближенное представление периодической функции с помощью гармонических (или экспоненциальных) составляющих.

Разложение в ряд Фурье возможно для функций, период которых удовлетворяет условиям Дирихле, то есть:

- содержит конечное количество разрывов первого рода – точек, в которых односторонние пределы конечны, но не равны;
- содержит конечное количество экстремумов;
- не содержит разрывов второго рода – точек, в которых один из односторонних пределов бесконечен.

При разложении периодического колебания $S(t)$ в ряд Фурье можно выбрать одну из систем базовых функций:

$$\{1, \cos\omega_1 t, \sin\omega_1 t, \cos\omega_2 t, \sin\omega_2 t, \dots, \cos\omega_k t, \sin\omega_k t\}, \quad (38)$$

$$\{\dots e^{-j\omega_k t}, \dots e^{-j\omega_1 t}, 1, e^{j\omega_1 t}, \dots e^{j\omega_k t}, \dots\}, \quad (39)$$

где k – номер гармоники, ω_1 – круговая частота, соответствующая периоду сигнала T :

$$\omega_1 = \frac{2\pi}{T}, \quad (40)$$

и

$$\omega_k = \omega_1 = k \frac{2\pi}{T}. \quad (41)$$

В соответствии с базисной системой выделяется и две различные формы записи ряда Фурье – комплексная и тригонометрическая (вещественная). Наиболее часто используемой в геофизике является тригонометрическая (вещественная) форма ряда Фурье. В этой форме ряд Фурье произвольного периодического сигнала $S(t)$ можно представить в виде бесконечной суммы:

$$S(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} [A_k \cos\omega_k t + b_k \sin\omega_k t], \quad (42)$$

где коэффициенты A_0 , A_k и B_k рассчитываются по формулам:

$$A_0 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} S(t) dt, \quad (43)$$

$$A_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} S(t) \cos \omega_k t dt, \quad (44)$$

$$B_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} S(t) \sin \omega_k t dt, \quad (45)$$

Таким образом, любую периодическую функцию, которая удовлетворяет условиям Дирихле, возможно разложить в ряд Фурье, представив ее в виде суммы синусов и косинусов.

Спектр периодической функции изображается отдельными линиями, каждая из которых соответствует определенной частоте, включая частоту 0 (постоянная составляющая). Такие спектры носят название дискретных или линейчатых. В качестве амплитудного спектра используется совокупность амплитуд гармоник вещественной формы ряда Фурье (38) – $\{A_0/2, A_1, A_2, \dots\}$.

В практической деятельности геофизики имеют дело с конечными по времени сигналами. В этом случае, чтобы реализовать разложение в ряд, делается допущение, что сигнал бесконечно повторяет себя в обоих направлениях. При таком допущении спектр дискретного периодического сигнала можно рассчитать с помощью дискретного преобразования Фурье (ДПФ), которое имеет следующий вид:

$$X_k = \frac{1}{N_d} \sum_{d=1}^{N_d} A_d \left[\cos \frac{2\pi k d}{N_d} - j \sin \frac{2\pi k d}{N_d} \right], \quad (46)$$

После выполнения преобразования (41) сигнал оказывается представленным в виде коэффициентов, которые соответствуют амплитудам и фазам частот, составляющих этот сигнал:

$$\operatorname{Re} X_k = A_k = \frac{1}{N_d} \sum_{d=1}^{N_d} A_d \cos \frac{2\pi k d}{N_d}, \quad (47)$$

$$\operatorname{Im} X_k = B_k = \frac{1}{N_d} \sum_{d=1}^{N_d} A_d \sin \frac{2\pi k d}{N_d}, \quad (48)$$

$$\operatorname{Abs}[X_k] = \sqrt{\operatorname{Re} X_k^2 + \operatorname{Im} X_k^2}, \quad (49)$$

$$\varphi[X_k] = \tan^{-1} \frac{\operatorname{Im} X_k}{\operatorname{Re} X_k}, \quad (50)$$

где $\operatorname{Abs}[X_k]$ – амплитудный спектр сигнала (спектр амплитуд), а $\varphi[X_k]$ – фазовый спектр сигнала (спектр фаз).

Фактически, дискретное преобразование Фурье позволяет представить дискретную периодическую функцию в виде конечного числа частот (гармоник) с определенными значениями амплитуды и фазы. Для определения амплитуд и фаз частотных составляющих сигнала (гармоник) в дискретном преобразовании Фурье

используют базисные функции синуса и косинуса. Спектр частот в ДПФ определяется из амплитуд синусов и косинусов, с частотами повторения в исследуемой выборке от 0 до $N_d/2$ раз. Преобразование Фурье раскладывает дискретизированный сигнал из N_d отсчетов на $N_d/2+1=N_k$ синусных и $N_d/2+1=N_k$ косинусных составляющих.

Таким образом, базовой основой для спектральных сейсмических атрибутов являются амплитудный и фазовый спектры, которые обычно представляют в виде графиков или гистограмм (рисунок 100). Сами спектральные сейсмические атрибуты основаны на анализе амплитудного и фазового спектров сейсмических сигналов. Приведем формулы для расчета некоторых наиболее широко распространенных *спектральных сейсмических атрибутов*.

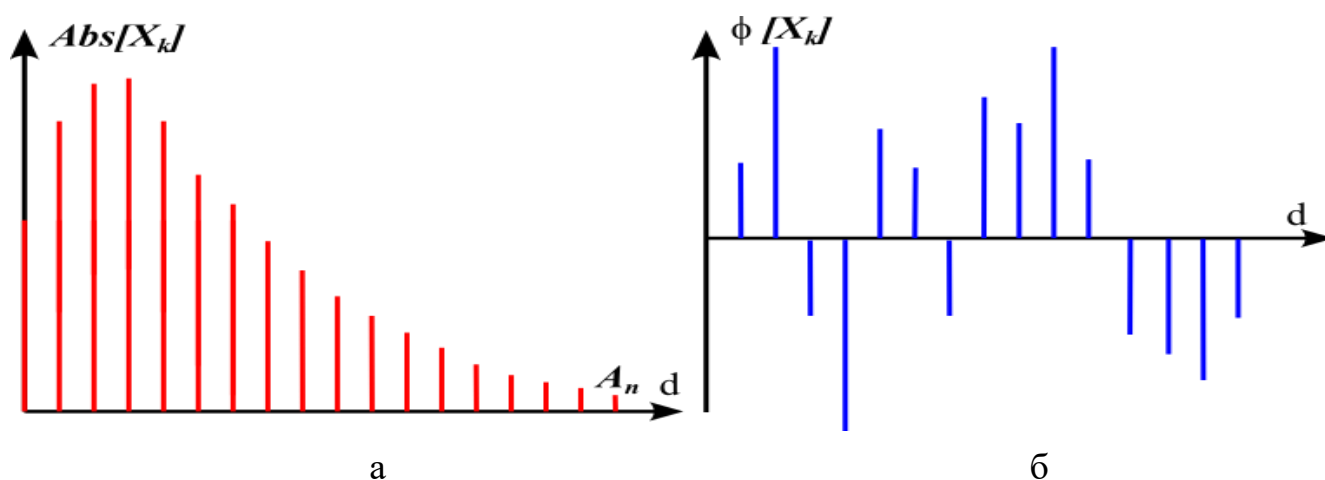


Рисунок 100 – Пример представления спектра амплитуд (а) и спектра фаз (б) в виде гистограмм (по данным [25])

Пиковая частота – характеризует частоту, на которой отмечается максимум амплитудного спектра (49). Отыскивается простым перебором значений амплитудного спектра, результат представляет собой частоту, на которой находится максимальное значение амплитудного спектра.

Спектральный центроид – соответствует центру тяжести фигуры, ограниченной спектральной кривой, и указывает на частоту, на которой сосредоточена основная энергия явления в спектре:

$$f_c = \frac{\sum_{k=0}^{N_k-1} f_k \text{Abs}[X_k]}{\sum_{k=0}^{N_k-1} \text{Abs}[X_k]}, \quad (51)$$

где f_k – частота, соответствующая гармонике с номером k .

Спектральная энергия – площадь, ограниченная кривой на всем частотном диапазоне, соответствует энергии сигнала:

$$E_c = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=0}^{N_k-1} (Abs[X_k])^2 \quad (52)$$

Ширина спектра – характеристика, используемая для изучения разброса энергии относительно центроида f_c . Для ее оценки используется методика, аналогичная методике вычисления среднего квадратического отклонения в математической статистике [288]:

$$df = \sqrt{\frac{\sum_{k=0}^{N_k-1} (f_k - f_c)^2 (Abs[X_k])^2}{\sum_{k=0}^{N_k-1} (Abs[X_k])^2}}, \quad (53)$$

Кажущаяся (видимая) частота – это частота, которая воспринимается наблюдателем, но может отличаться от фактической, оценивается по количеству переходов через ноль:

$$f_{\text{каж}} = \frac{N_{z0}-1}{2(t_N-t_1)}, \quad (54)$$

где N_{z0} – количество переходов сигнала через ноль, t_N – время последнего перехода через ноль, t_1 – время первого перехода через ноль.

Корреляционные характеристики. В качестве основных корреляционных характеристик можно привести такие характеристики, как отношение сигнал–шум, и сдвиг трасс.

Отношение сигнал–шум. Представляет собой формализованную оценку соотношения энергии полезной и шумовой составляющих сигнала, оценивается по нормированной взаимной корреляции между парами соседних трасс в окне анализа:

$$S/N = \frac{\max\{\widehat{B}_{1,2}\}}{1 - \max\{\widehat{B}_{1,2}\}}, \quad (55)$$

где $\max\{\widehat{B}_{1,2}\}$ – наибольшее значение нормированной функции взаимной корреляции:

$$\widehat{B}_{1,2}(d) = \frac{\sum_{d=0}^{N_d-1-k} A_{1,d} A_{2,d+k}}{\sqrt{\sum_{d=0}^{N_d-1} A_{1,d}^2} \sqrt{\sum_{d=0}^{N_d-1} A_{2,d}^2}}, \quad (56)$$

Сдвиг трасс. Характеризует наклон отражения относительно горизонтального положения. Оценивается по модулю сдвига максимума функции взаимной корреляции анализируемых участков пар соседних трасс (56).

С использованием описанных сейсмических атрибутов выполнено

исследование закономерностей распределения характеристик отражений, связанных с эрозионными врезами и инверсией соляных поднятий. В итоге выявлены сейсмические атрибуты, реагирующие на рассматриваемые геологические аномалии. Всего исследовано десять сейсмических атрибутов – пиковая частота, ширина спектра, спектральный центроид, спектральная энергия, кажущаяся частота, среднеквадратическая амплитуда, максимальная амплитуда, средняя абсолютная амплитуда, соотношение сигнал/шум, сдвиг трасс. Исследования на чувствительность указанных атрибутов к наличию опасных процессов проведены для интервала, в котором залегает горизонт «соляное зеркало» и для интервала переходных пачек.

Важным моментом при вычислении атрибутов является выбор окна расчета, размер которого выбирается на основе положений теории обработки геофизической информации. Большое окно повышает детальность частотных характеристик, но, при этом, снижает разрешающую способность рассчитываемого атрибута по времени. Маленькое окно наоборот – повышает разрешающую способность по времени, но снижает детальность самой характеристики в частотной области.

Опытным путем и на основе результатов исследований [216, 210] установлено, что наилучшим является размер окна анализа в пределах от одного до двух видимых периодов сейсмической записи, для случая шахтной сейсморазведки в условиях ВКМС это 10-20 мс. Такое окно дает разумный баланс между детальностью в частотной и временной областях. Для практической реализации процедуры атрибутного анализа разработано специальное программное обеспечение, позволяющее выполнить ее без привлечения дополнительных программ [245]. Программа обеспечивает автоматическое формирование результатов расчетов в виде разрезов атрибутов в тех же шкалах, что и исходный глубинный разрез.

В ходе исследования поведения сейсмических атрибутов выяснено, что некоторые из них четко реагируют на изменения ИГУ выходом за пределы 2σ , причем часть из них выходят за указанные пределы снизу, а часть – сверху, что дает возможность использовать их для построения карты районирования и классификации состояний ПТС. Ту же часть атрибутов, которые не реагируют на изменения ИГУ и наличие опасных процессов, использовать бесперспективно, в

связи с чем они исключены из дальнейшего использования.

В качестве примера ниже приведены результаты атрибутного анализа для одного из участков, на которых были выполнены исследования способности сейсмических атрибутов выявлять области с опасными процессами. Основой для анализа послужила геофизическая модель, полученная в области одного из участков с инверсионным рельефом, известных на территории ВКМС (рисунок 101). На геофизической модели выделяются основные расчётные элементы, характерные для ПТС «инженерно-геологический массив – подземные сооружения» – соляно-мергельная толща, карналлитовая и сильвинитовая пачки, подстилающая каменная соль.

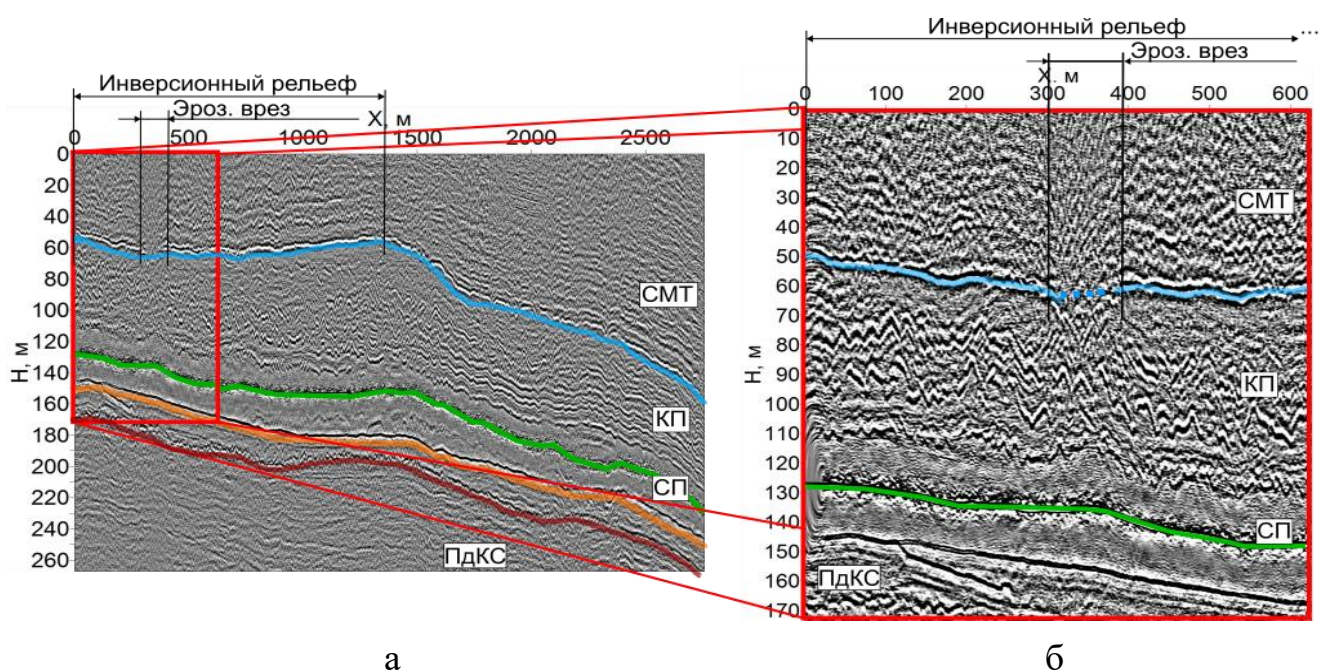


Рисунок 101 – К определению закономерностей распределения характеристик отражений, связанных с опасными процессами: а – геофизическая модель в области инверсионного рельефа, б – увеличенный участок модели в области эрозионного вреза (по данным автора [101])

В результате расчетов для исследуемой геофизической модели получают ряд разрезов сейсмических атрибутов, характеризующих особенности распределения упругих свойств, связанных с инженерно-геологическими условиями (рисунок 102). Видно, что некоторые атрибуты уверенно реагируют на наличие инверсионного рельефа либо на наличие эрозионного вреза, либо и на то и другое одновременно повышенными, либо пониженными значениями.

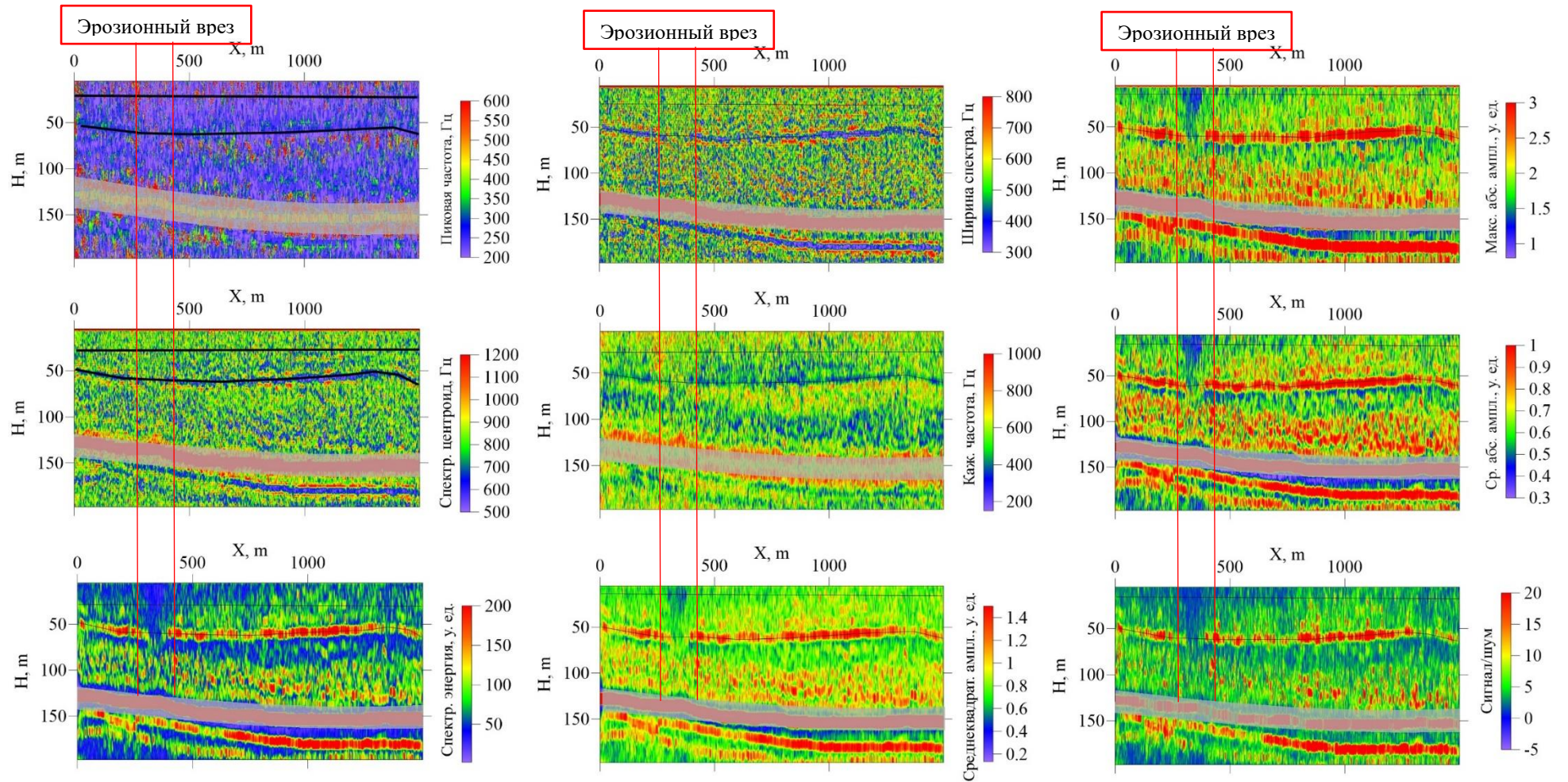


Рисунок 102 – Фрагменты разрезов сейсмических атрибутов для геофизической модели (рисунок 101). Название атрибутов приведены на соответствующих цветовых шкалах справа от разрезов (по данным автора)

Так, область эрозионного вреза на большинстве сейсмических атрибутов отмечается резким снижением их значений, а область инверсионного рельефа в целом – наоборот, вызывает увеличение значений большинства атрибутов. Анализ поведения атрибутов выполняется вдоль отражений, ассоциируемых с геологическими границами в интервале верхних по разрезу пластов солей, в данном случае это кровля ПКС и граница в пределах СМТ. То есть, разрезы атрибутов подвергаются качественному анализу, а для этапа количественного анализа используются графики атрибутов, полученные вдоль выделенных геологических границ (рисунок 103).

Результаты предыдущих исследований указывают, что надежным инструментом для объективного анализа поведения сейсмических атрибутов являются инструменты, имеющиеся в математической статистике [225]. В частности, в статистике существует эмпирическое правило, также называемое правилом трех сигм, или правило 68 – 95 – 99.7, которое предсказывает отклонения от среднего значения или медианы выборки. Оно указывает на то, что при нормальном распределении 68% наблюдений будут находиться в пределах первого стандартного отклонения ($\bar{x} \pm \sigma$), 95% – в пределах первых двух стандартных отклонений ($\bar{x} \pm 2\sigma$), а 99.7% – в пределах первых трех стандартных отклонений от среднего значения [138, 152, 304].

Под σ в математической статистике понимается стандартное отклонение, оно характеризует разброс данных относительно среднего значения. При маленьком стандартном отклонении большинство значений сконцентрировано близко к среднему, и наоборот. Формула вычисления стандартного отклонения для выборки:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}}, \quad (57)$$

где N – количество значений в выборке, x_i – значение выборки с номером i , $\bar{x}$ – среднее арифметическое всех значений в выборке.

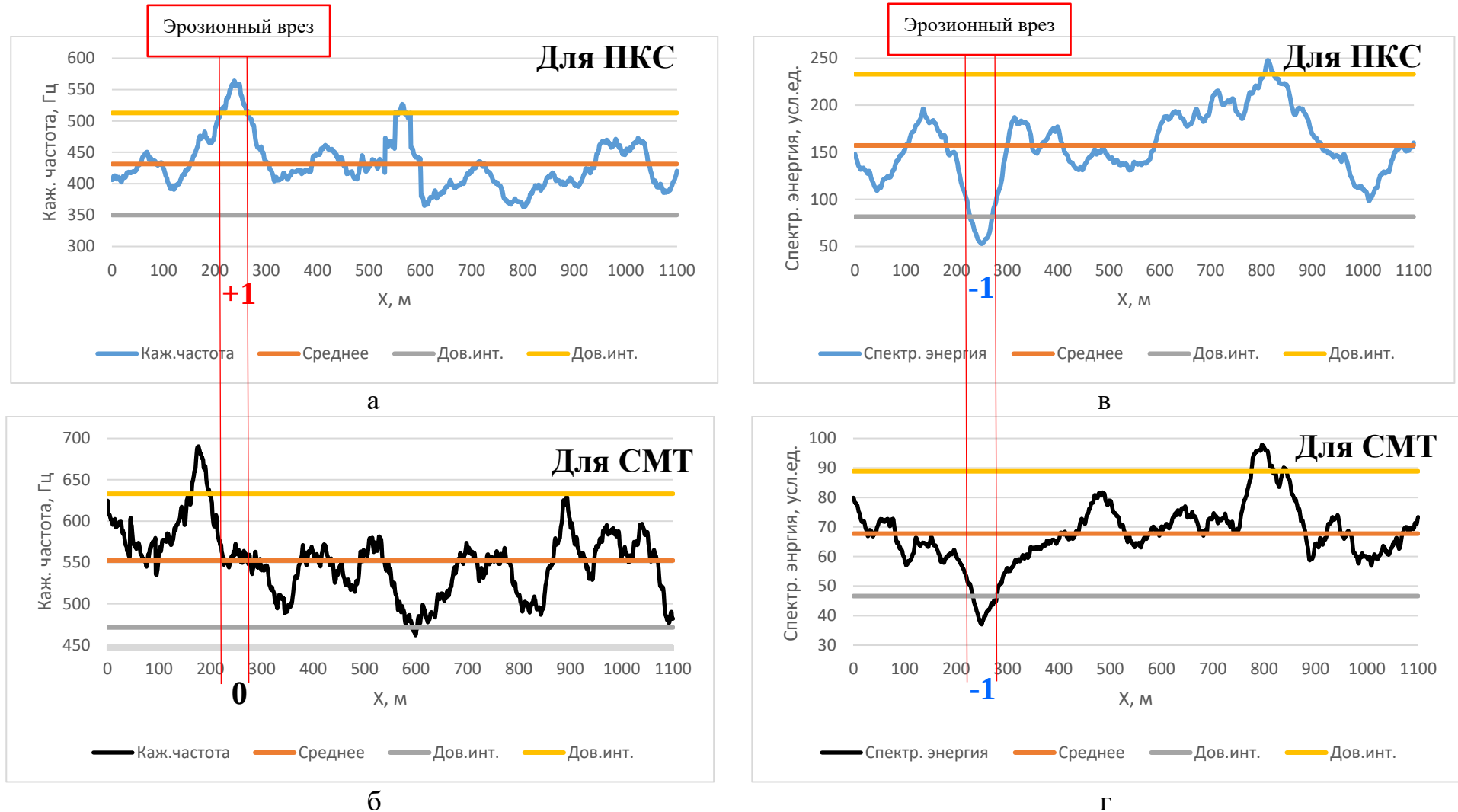


Рисунок 103 – Примеры распределения сейсмических атрибутов в области эрозионного вреза для геофизической модели (рисунок 101): а, б – кажущаяся частота, в, г – спектральный центроид, цифрами -1, 0, +1 обозначен выход графиков за пределы 2σ , красными линиями – граицы эрозионного вреза (по данным автора)

Анализ поведения атрибутов в верхних по разрезу пластах солей на всех доступных участках исследований показал, что наиболее надежным признаком наличия эрозионного вреза, как одного из самых опасных геологических процессов на месторождениях солей, в том числе и на Верхнекамском, является выход экстремума графика сейсмического атрибута за пределы 2σ (показаны на рисунке желтой и серой горизонтальными линиями) (рисунок 103). Выход значений сейсмического атрибута за пределы 2σ указывает на то, что упругие характеристики горных пород, слагающих изучаемый интервал, либо форма их залегания, значительно отличаются от соответствующих характеристик вмещающих пород, при этом качественный (визуальный) анализ геофизических моделей зачастую не позволяет установить данный факт.

Результаты исследований поведения сейсмических атрибутов и связи его с инженерно-геологическими условиями и опасными процессами по всем участкам сведены в таблицу, где знаком «–» обозначены характеристики, реагирующие на опасные процессы выходом за пределы 2σ снизу, знаком «+» – выходом за пределы 2σ сверху, пустые ячейки соответствуют отсутствию реакции сейсмического атрибута на исследуемое опасное явление (таблица 6).

Совместное использование сейсмических атрибутов различной физической природы значительно повышает надежность выявления объектов поиска за счет снижения неоднозначности, присущей отдельным характеристикам геофизических моделей, поэтому отдельные атрибуты объединяются в суммарный сейсмический атрибут (ССА). Его использование допустимо как отдельно от остальных атрибутов, так и в их составе. Объединение выполняется либо на основе вычисления среднего арифметического частных нормированных сейсмических атрибутов, либо на основе умножения отдельных атрибутов друг на друга, после чего в обоих случаях суммарный сейсмический атрибут S_{cca} снова нормируется к интервалу $(-1, 1)$:

$$S_{cca\ t, tr} = \frac{\sum_{i=1}^{N_s} S_{i, t, tr}}{N_s}, \quad (58)$$

где, t – время, для которого выполняется анализ, tr – номер сейсмической трассы, для которой выполняется анализ, $S_{i, t, tr}$ – значение i -го нормированного сейсмического атрибута в точке с координатами t , tr , N_s – количество атрибутов, использованных для расчетов.

Таблица 6 – Связь наличия эрозионных врезов и инверсии соляных поднятий с распределением сейсмических характеристик

Сейсмический атрибут	Эрозионный врез - выход за 2σ		Инверсионный рельеф - выход за 2σ		Зона замещения - выход за 2σ
	СМТ	ПКС	СМТ	ПКС	КП
Пиковая частота			+	+	+
Спектральный центроид		+		+	+
Спектральная энергия	–	–	–	–	–
Ширина спектра		+		+	+
Кажущаяся частота		+	+	+	+
Среднеквадр. амплитуда	–	–	+	+	–
Максимальная амплитуда	–	–	+	+	–
Средняя амплитуда	–	–	+	+	–
Отношение сигнал/шум	–	–	+	+	–
Сдвиг трасс	+	+			

С учетом выявленных закономерностей структурных характеристик геологического строения, распределения сейсмических атрибутов в вертикальной плоскости (таблица 4), и критериев устойчивости, разработана классификации физического состояния изучаемой природно-технической системы (таблица 7). Отдельно оцениваются закономерности, выявленные в результате кинематической интерпретации (мощность водозащитной толщи) и динамической интерпретации (поведение сейсмических атрибутов).

Всего выделено три состояния ПТС – устойчивое, неустойчивое и критическое (нарушенное). Отнесение ПТС к тому или иному состоянию выполняется по наихудшему из условий устойчивости. Например, если по всем условиям, кроме мощности ВЗТ по данным шахтной сейсморазведки ПВРО, ПТС находится в устойчивом состоянии, а по мощности ВЗТ – в критическом, то общее

состояние ПТС необходимо признать критическим. То же самое относится и к остальным условиям устойчивости, в том числе и к геофизическим.

Таблица 7 – Оценка физического состояния ПТС с учетом геолого-геофизических признаков

Условия устойчивости ВЗТ	Состояние природно-технической системы «инженерно-геологический массив – подземное сооружение»		
	1 – устойчивое	2 – неустойчивое	3 – критическое
Риск наличия опасных процессов в ВЗТ	$P < 0.5$	$0.75 > P > 0.5$	$P > 0.75$
Выход атрибутов за пределы 2σ	Отсутствует	Инверсионный разрез, ЭВ до КП	Инверсионный разрез, ЭВ до СП
Мощность ВЗТ по данным ПВРО, м	Есть КП и ПКС $H > 70$ м	ПКС отсутствует $70 \text{ м} > H > 20$ м	КП отсутствует $H < 20$ м
Аномалии в ВЗТ по данным бурения и проходки	Отсутствуют, либо 4 группы	Косвенные признаки разломов, сухие трещины, зоны замещения, аномалия 2 или 3 группы	Разломы, трещины с течью рассолов, обширные зоны замещения, отсутствие ПКС, аномалия 1 группы
Мощность ненарушенных слоев КС в ВЗТ	$H > 20$ м	$H = 20$ м	$H < 20$ м
Степень нагружения целиков	Степень нагружения < 0.3	Степень нагружения $= 0.3$	Степень нагружения > 0.3
Поступление флюидов в выработки	Отсутствует	Приток насыщенных флюидов	Приток ненасыщенных флюидов

На основе разработанной классификации выполнено районирование ВКМС по состоянию ПТС «инженерно–геологический массив – подземные сооружения», и сформирована соответствующая карта (рисунок 104). Основным уточняющим фактором по отношению к карте районирования ВКМС по признаку наличия опасных геологических процессов (рисунок 98) явились результаты расчета и анализа сейсмических атрибутов, полученных по данным шахтной сейсморазведки, и связанных с изменениями инженерно-геологических условий залегания верхних пластов галогенной формации – расчетных элементов РП, ПКС, КП.

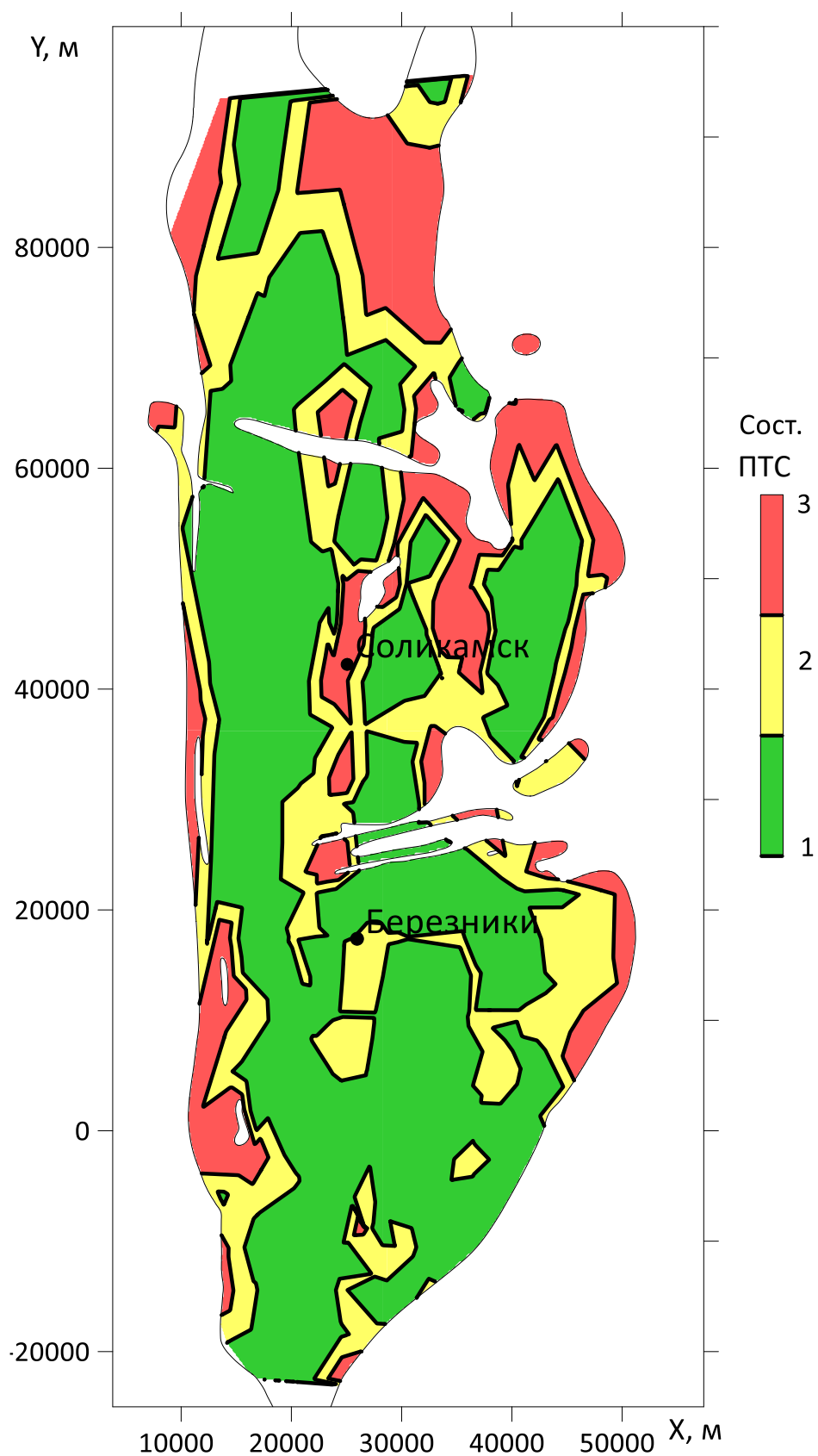


Рисунок 104 – Карта районирования ВКМС по состоянию ПТС
«инженерно-геологический массив – подземные сооружения» (по данным автора [214])

На момент написания настоящей работы данные расчеты и анализ проведены для большинства из действующих на ВКМС рудников. Полученные материалы позволили установить, что наличие эрозионных врезов и инверсионного рельефа по кровле соляных поднятий фиксируется, начиная с риска наличия опасных процессов Р, большего 0.5.

Иначе говоря, в случае отсутствия явных признаков нарушения целостности ВЗТ, при риске наличия аномалии в водозащитной толще 0.5 и выше, выполнение шахтных сейсморазведочных работ методом ПВРО является обязательным, поскольку уже начиная с указанной величины риска инженерно-геологические условия могут включать в себя опасные процессы.

Участки критического состояния ПТС «инженерно-геологический массив – подземные сооружения» тяготеют к северной части ВКМС, где они охватывают порядка 25% площади (рисунок 104). Указанные участки оконтурены относительно узкими областями с неустойчивым состоянием ПТС. На южной части месторождения участки развития опасных процессов сконцентрированы, в основном, на восточной и западной окраинах, также относительно небольшие участки, на которых состояние ПТС «инженерно-геологический массив – подземное сооружение» оценивается как неустойчивое, отмечаются в центральной части южной половины ВКМС.

4.4 Методика оценки инженерно-геологических условий водозащитной толщи

Итогом объединения представленных разработок в единую логически связанную схему является методика оценки инженерно-геологических условий водозащитной толщи, основанная на установленных морфологических характеристиках геологического разреза и закономерностях распределения сейсмических атрибутов (рисунок 105).

Методика учитывает:

- геотехнические параметры – степень нагружения целиков, мощность ненарушенных слоев каменной соли (КС) в ВЗТ, поступление флюидов в выработки;

- геологические параметры – аномалии в ВЗТ по данным бурения и проходки, аномалии в ВЗТ на основе выявленных закономерностей;
- геофизические признаки – выход сейсмических атрибутов за пределы 2σ , и мощность ВЗТ по результатам шахтной сейсморазведки ПВРО.



Рисунок 105 – Методика анализа инженерно-геологического состояния и прогноза гидрогеологических свойств водозащитной толщи (по данным автора [214])

На первом этапе практической реализации методики выясняется, относится ли исследуемый участок к областям с предполагаемыми опасными инженерно-геологическими процессами. В случае, если относится, то шахтная сейсморазведка ПВРО на таком участке должна выполняться в обязательном порядке, поскольку

некорректность инженерно-геологической модели в случае наличия опасных процессов с высокой вероятностью приведет к возникновению критической ситуации. В случае, если наличие опасных процессов маловероятно, решение о проведении геофизических исследований оставляется на усмотрение компании-недропользователя, и, как правило, реализуется при возникновении признаков осложнения инженерно-геологических условий.

После получения результатов шахтной сейсморазведки, вся имеющаяся геологическая, геотехническая и геофизическая информация анализируется и ранжируется согласно разработанной классификации (таблица 7). В случае, если доказано наличие опасных процессов, и состояние ПТС признано неустойчивыми или критическими, в проект строительства подземных сооружений вносятся соответствующие коррективы.

Таким образом, установлена взаимосвязь распределения инженерно-геологических характеристик разреза – наличие гипсово-глинистой шляпы, угол падения крыльев поднятия, мощность ритмопачек и покрывающей каменной соли, расстояние от оси поднятия, и риска возникновения опасных геологических процессов в водозащитной толще, на базе чего выполнено районирование территории по риску наличия эрозионных врезов и инверсионного рельефа, а также сформирована классификация состояний природно-технической системы по комплексу геолого-геофизических признаков. На этой основе создана формализованная методика анализа инженерно-геологического состояния и прогноза гидрогеологических свойств ВЗТ для повышения безопасности эксплуатации подземных сооружений.

Глава 5. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗА СОСТОЯНИЯ ГИДРОИЗОЛИРУЮЩИХ ЦЕЛИКОВ

Четвертое защищаемое научное положение. Разработана методика детального сейсмического анализа и мониторинга состояния геотехнических массивов с заданными прочностными, деформационными и гидроизолирующими характеристиками (гидроизолирующих целиков) на основе адаптированного для горизонтальной плоскости метода шахтной сейсморазведки ПВРО с регистрацией продольных и поперечных волн. Методика обеспечивает оценку, мониторинг и прогноз состояния целиков по комплексу характеристик: ширина, упругие константы (коэффициента Пуассона, модулей упругости и сдвига), предел прочности на сжатие и степень нагружения.

5.1 Модели гидроизолирующих целиков во взаимодействии с рассолами

Согласно законодательству РФ в области промышленной безопасности, на горнопромышленных территориях, в частности – в условиях соляных рудников, возможна ликвидация отдельных частей комплексов подземных сооружений (шахтных полей) путем заполнения их рассолами. Размещение рассолов в очистных камерах приводит к снижению действующих напряжений и интенсивности смещений породного контура и подработанной толщи. Это объясняется наличием «наполнителя» в подземных сооружениях, что приводит к формированию квазисплошной системы, при которой исключается влияние концентраторов напряжений [22].

С точки зрения напряженного состояния пород междупанельного целика, при размещении рассолов в границах панели, в нем фиксируется снижение разности компонент тензора напряжений и, как следствие, величины действующих касательных напряжений и интенсивности напряжений. В части сплошности пород целика такой механизм является положительным, поскольку снижение действующих касательных напряжений минимизирует риск подвижек между слоями. Таким образом, исключается расслоение пород и возможные эффекты

дилатансии.

Действующая часть шахтного поля отделяется от заполняемой рассолами так называемыми *гидроизолирующими целиками* (ГЦ), которые находятся между подземными сооружениями и относятся к геотехническим массивам с заданными прочностными, деформационными и гидроизолирующими свойствами. Как правило, роль ГЦ играют межпанельные целики значительной ширины – в десятки и даже сотни метров. Выработки, соединяющие действующую часть шахтного поля с ликвидируемой, перекрываются специально возводимыми гидротехническими сооружениями – *гидроизолирующими перемычками*, которые препятствуют проникновению закладочных рассолов в функционирующие подземные сооружения.

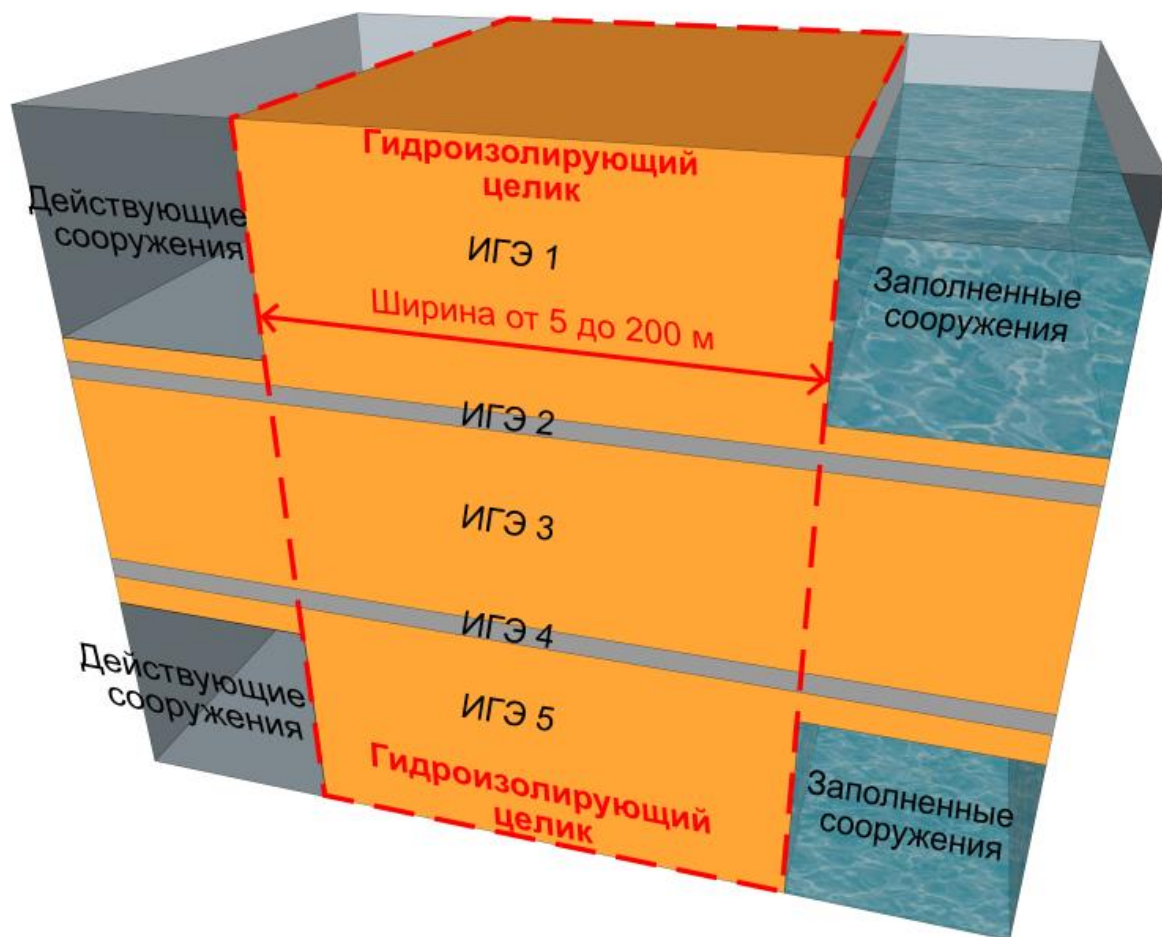


Рисунок 106 – Обобщенная схема объекта исследований – гидроизолирующего целика (по данным автора)

Данный способ ликвидации подземных сооружений весьма эффективен с

экономической точки зрения, поскольку и механическая, и гидравлическая (шламовая) закладка выработанного пространства обходится предприятиям гораздо большими затратами материальных, человеческих и временных ресурсов.

Предыдущими исследованиями доказано [48], что даже в отсутствии техногенного воздействия, приводящего к циркуляции рассолов в подземных сооружениях и ускорению процессов выщелачивания солей, происходит неравномерное растворение целиков. Это происходит за счет гравитационной дифференциации рассолов в зависимости от их насыщения, под воздействием которой ненасыщенные рассолы за счет меньшей плотности мигрируют вверх, а насыщенные, за счет большей плотности – вниз (рисунок 107). В течение довольно короткого времени концентрация рассолов в верхней и нижней частях подземных сооружений приобретает значительную разницу, приводящую к активному растворению солей ненасыщенными рассолами.



Рисунок 107 – Гравитационная дифференциация рассолов в зависимости от их насыщения – двумерная модель – вертикальный срез вкост оси подземного сооружения, заполненного рассолом (по данным автора)

В результате быстрее всего происходит растворение в верхней части подземного сооружения. Растворение достигает, по результатам экстраполяции результатов физического моделирования на подземные сооружения [48] порядка трех метров в каждую сторону через 300 суток, и шести метров через 590 суток (рисунок 108). В случае, когда ширина гидроизолирующего целика составляет 100 и более метров, запас времени на его растворение составляет значительное время –

десятки лет. Однако, нельзя забывать о том, что одновременно с уменьшением ширины целика синхронно увеличиваются размеры кровли выработки, в следствие чего устойчивость всей ПТС падает в геометрической прогрессии. Также значительную роль играют и процессы смачивания солей и глинистых пропластков между ними, что приводит к резкому уменьшению сцепления отдельных слоев и ухудшению физико-механических свойств горных пород.

Время с момента заполнения:

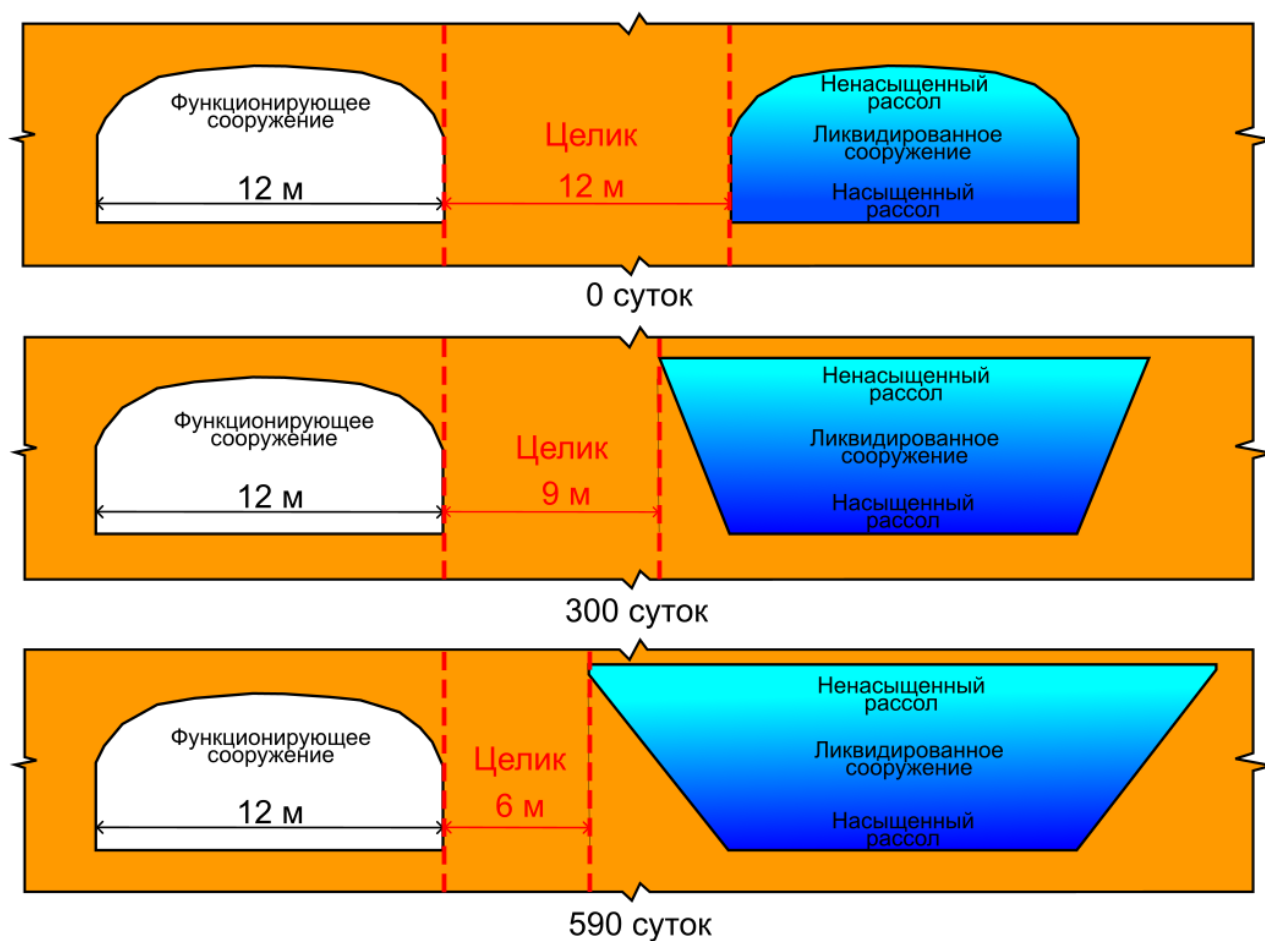


Рисунок 108 – Двумерная модель растворения целиков, учитывающая миграцию рассолов в вертикальной плоскости вкрест оси подземного сооружения (по данным автора)

В случае же, когда речь идет о целиках между очистными камерами (подземными сооружениями, предназначенными для выемки полезного ископаемого), ширина которых на месторождениях солей редко превышает 10 метров, полное растворение целиков может занять всего несколько лет. Рассматриваемые процессы явным образом угрожают безопасной эксплуатации

действующих подземных сооружений уменьшением несущей способности целика за счет уменьшения его ширины.

В дополнение к двумерной модели растворения целика, представленной в работе [48], автором разработана трехмерная модель, учитывающая наклон оси подземного сооружения по отношению к горизонтальной плоскости. В такой модели учтена миграция рассолов не только в плоскости, перпендикулярной оси сооружения, но и вдоль нее (рисунок 109). В рассматриваемом трехмерном случае, когда подземное сооружение не горизонтально, миграция рассолов происходит в основном вдоль оси сооружения. Это приводит к концентрации насыщенных рассолов в самой низкой части сооружения, а ненасыщенных – в самой высокой, где происходит растворения практически по всему контуру сооружения, включая стены и подошву. Таким образом, уменьшается расстояние между соседними сооружениями не только по горизонтали, но и по вертикали. Кроме того, в зависимости от формы сооружения и перепада между отдельными его частями, возможно значительно более быстрое растворение целиков в самых высоких частях, чем это предсказывает двумерная модель.

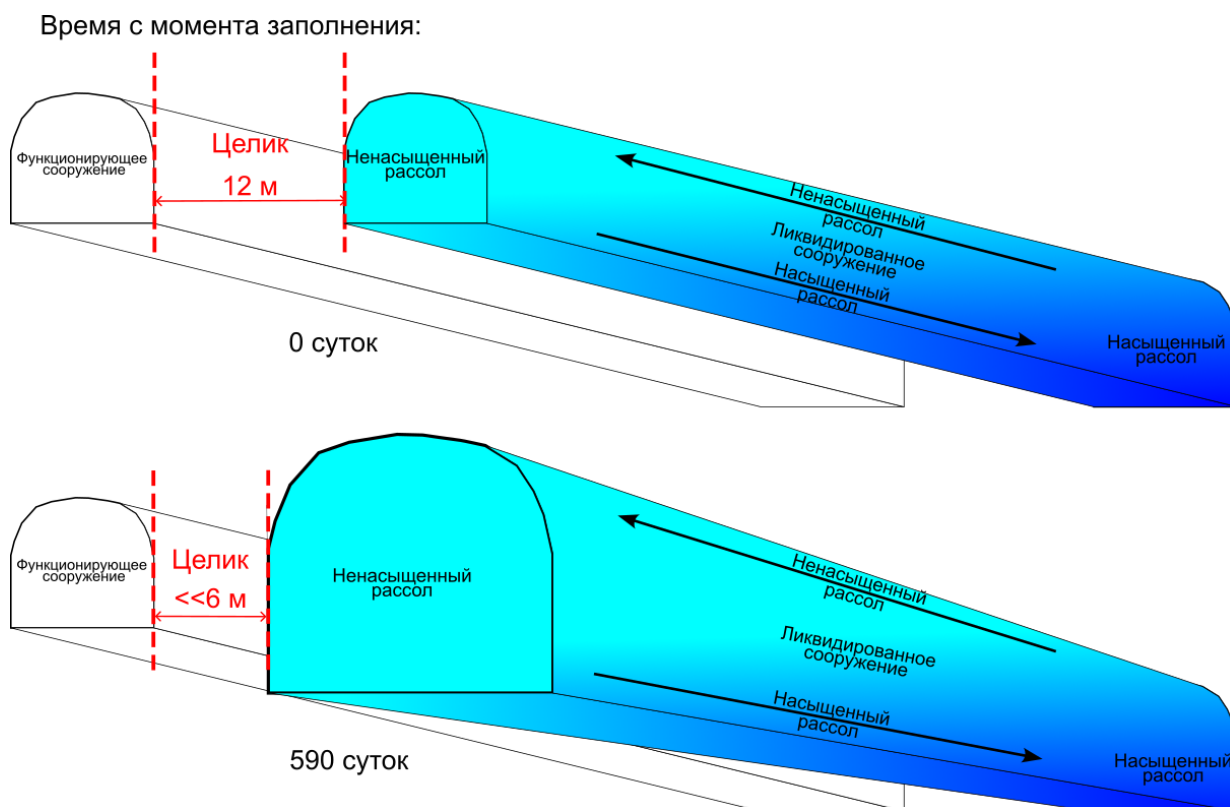


Рисунок 109 – Трехмерная модель растворения целиков, учитывающая миграцию рассолов в двух плоскостях – перпендикулярно оси подземного сооружения и вдоль нее (по данным автора)

Теоретические и экспериментальные исследования о возможности нарушения сплошности гидроизолирующих целиков подтверждаются аварийными ситуациями в рамках действующих комплексов подземных сооружений. Так, на одном из рудников ВКМС при складировании рассолов в подземном сооружении происходило бесконтрольное растворение целика, отделяющего его от других горных выработок. В результате растворение достигло критической величины, после чего произошла аварийная ситуация – прорыв рассолов в соседние подземные сооружения (рисунок 110). При этом необходимо отметить, что насыщенность рассолов была хоть и не предельной, но очень близкой к ней, и, тем не менее, растворение все равно оказалось возможным.



Рисунок 110 – Сквозное отверстие в гидроизолирующем целике – результат неконтролируемого растворения рассолами (по данным автора)

Таким образом очевидно, что при ликвидации подземных сооружений путем заполнения рассолами, необходим строгий контроль за шириной и состоянием гидроизолирующего целика в целях повышения безопасности эксплуатации действующих подземных сооружений. При этом, также в целях безопасности, гидроизолирующие перемычки делаются абсолютно глухими, в результате чего возможность установки в ликвидируемой части шахтного поля каких-либо контролирующих устройств полностью исключена. В сложившейся ситуации контроль за строением и состоянием гидроизолирующего целика невозможен только с использованием дистанционных методов, среди которых в подземных условиях шахтная сейсморазведка играет ведущую роль.

5.2 Моделирование распространения упругих колебаний в целиках

Теоретические и практические исследования, описанные в предыдущих главах, показали [207, 211, 224], что метод шахтной сейсморазведки ПВРО позволяет изучать горный массив в разных плоскостях, а также разделять отражения, приходящие из разных полупространств, что определяет принципиальную возможность изучения ширины и физических свойств целиков. Упругие волны, прошедшие через гидроизолирующий целик, отраженные от выработок с противоположной стороны целика и вернувшиеся к линии профиля, несут информацию о ширине и физических свойствах исследуемого целика. Поэтому, возможность получения хорошо различимых отражений от выработок, расположенных с противоположной стороны целика, полностью определяет возможность ведения мониторинговых наблюдений за его шириной и физическими свойствами. Применимость шахтной сейсморазведки для целей исследования и мониторинга физических свойств целика обоснована специально проведенным для этого численным и физическим моделированием [217].

Первоначальная оценка применимости шахтной сейсморазведки для решения рассматриваемой задачи может быть сделана на основе информации о разрешающей способности метода. Пиковая частота сигнала при шахтных сейсморазведочных исследованиях способом ПВРО в соляных рудниках составляет порядка 500 Гц, скорость распространения поперечных волн порядка 2500 м/с, продольных волн – порядка 4500 м/с, интервал исследуемых расстояний от 10 до 300 м во всех направлениях от шахтной выработки [224]. Теоретические значения вертикальной разрешающей способности на поперечных волнах при таких условиях составляют 1,25 м, а горизонтальной – от 2,6 до 13,7 м, в зависимости от глубины залегания исследуемого объекта [292]. Приведенные значения теоретической разрешающей способности подтверждаются на практике возможностью выделения тонких пластов карналлитовой породы в КП, мергелей и глин в ПП и ПдКС, что дает основания рассчитывать на положительные результаты при решении задачи мониторинга ширины и физических свойств ГЦ.

Для принципиальной оценки перспективности применения того или иного метода еще до начала натурных исследований принято выполнять численное моделирование. В рамках данной работы численное моделирование выполнено в программном обеспечении «ANSYS», позволяющем учесть физико-механические свойства горных пород и большинство физических эффектов, играющих роль при распространении упругих волн в твердой среде.

Результаты численного моделирования. Расчетная схема представлена плоской прямоугольной областью с сеткой. На границах области сформулированы условия отсутствия нормальных к границе перемещений $U_n = 0$. Размеры области выбраны такие, чтобы возмущение от её границ достигало подземного сооружения (выработки), расположенного в центре позже, чем туда придут сигналы, отраженные от выработок на противоположной стороне целика.

Выработка, в которой выполняются наблюдения (капитальная горная выработка), размерами 5 x 5 м находится в пласте КрII. В качестве выработок, от которых необходимо зафиксировать отражение, рассматриваются две очистные камеры в пласте КрII размерами 8 x 5 м и две очистные камеры в пласте АБ 5,5 x 3,5 м, мощность междупластья 8 м. Расстояние между осями очистных камер 16 м, расстояние между осями капитальной выработки и левой очистной камерой 150 м. В расчетах рассмотрены два типа ударной нагрузки: приложенной к боковой стенке капитальной выработки на высоте 1,5 м и к кровле выработки.

Результаты теоретических расчетов указывают на следующие основные моменты. Падающие продольные (рисунок 111) и поперечные волны (рисунок 112) преодолевают расстояние в 150 м с сохранением амплитуды, достаточной для формирования отраженной волны.

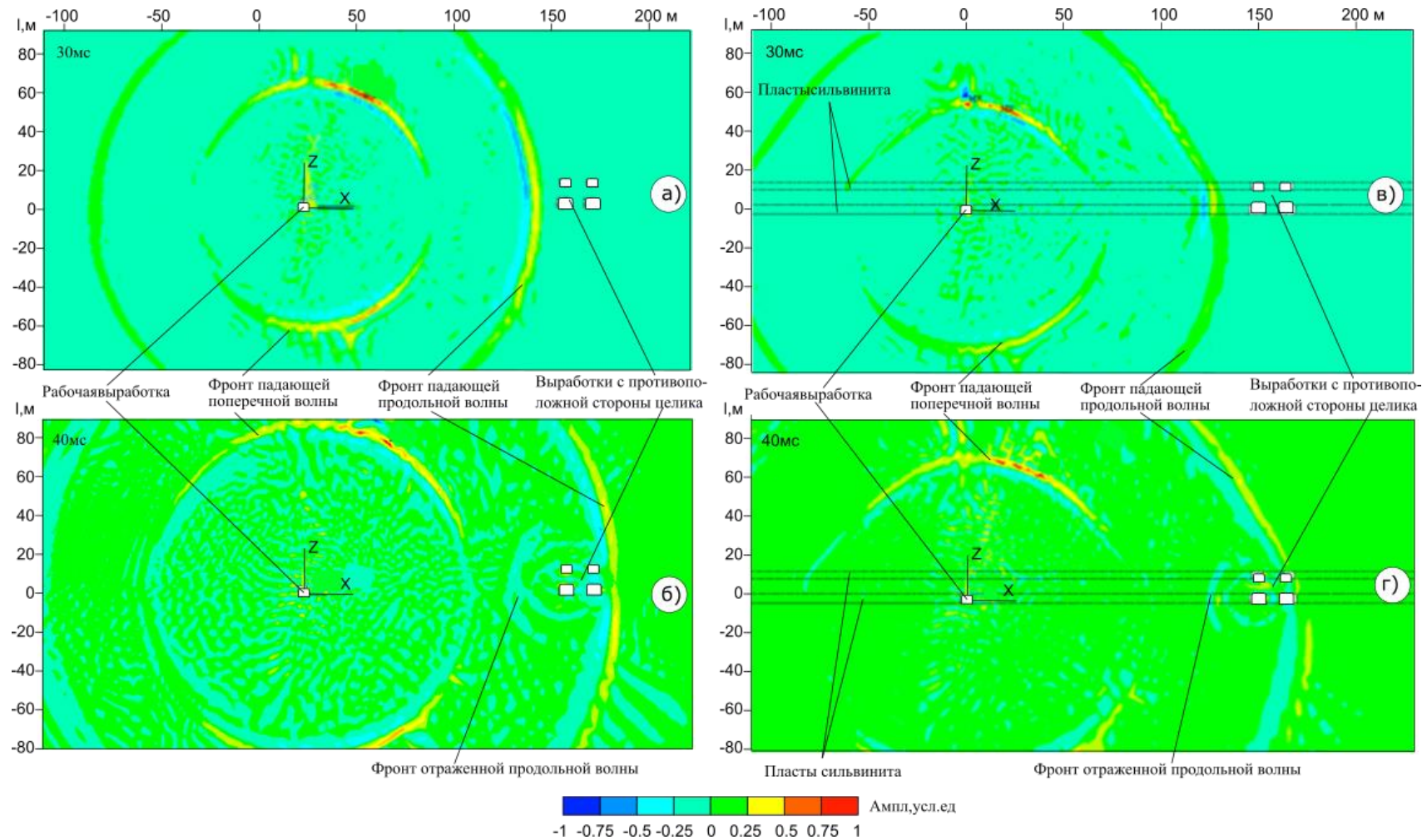


Рисунок 111 – Исследование отражения продольной волны – горизонтальная сила, поле горизонтальной составляющей скорости колебания частиц для однородной среды (а – для времени 30 мс, б – для времени 40 мс), и для неоднородной среды (в – для времени 30 мс, г – для времени 40 мс) (по данным автора [217])

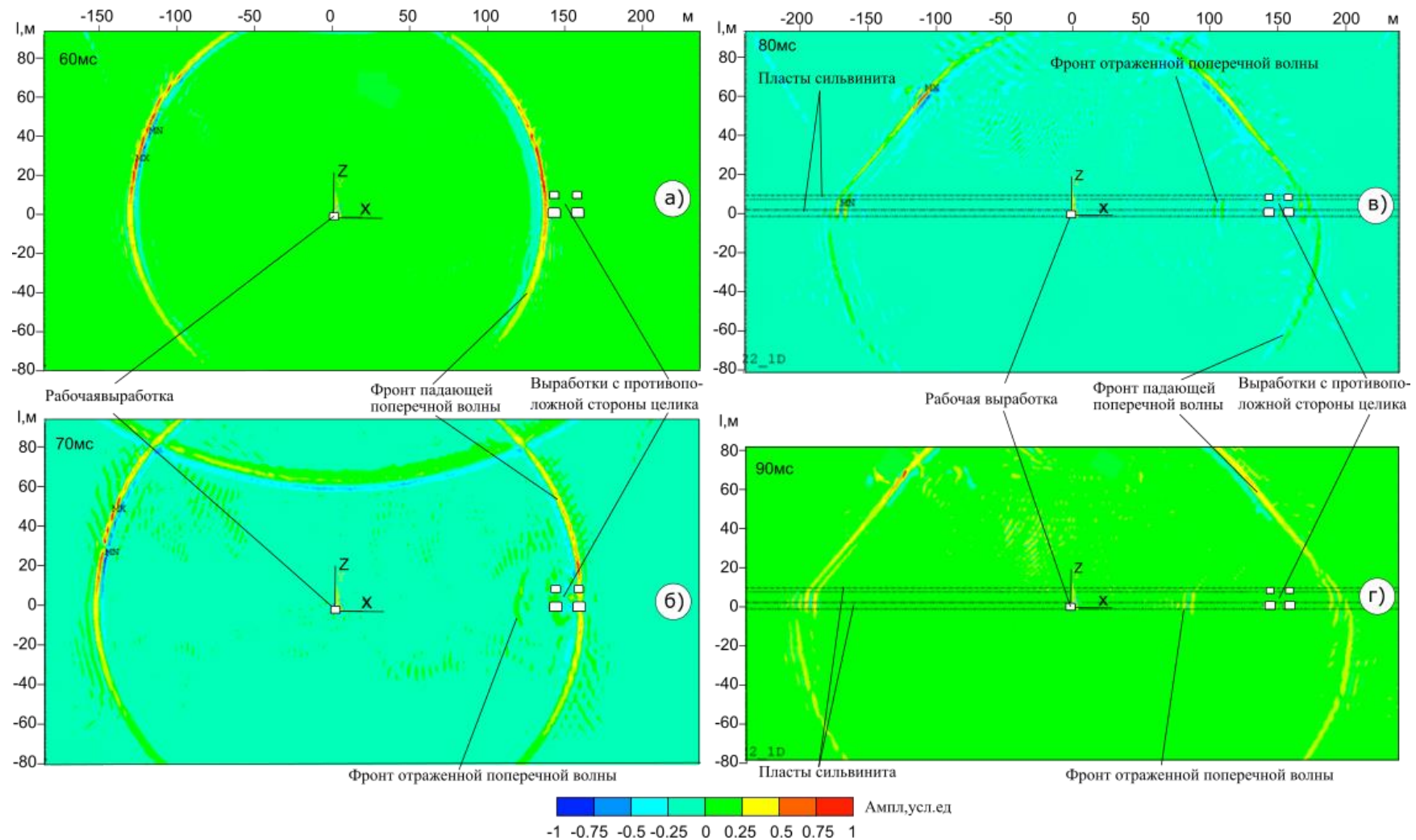


Рисунок 112 – Исследование отражения поперечной волны – вертикальная сила, поле вертикальной составляющей скорости колебания частиц для однородной среды (а – для времени 60 мс, б – для времени 70 мс), и для неоднородной среды (в – для времени 80 мс, г – для времени 90 мс) (по данным автора [217])

Отраженные волны также хорошо различимы во всех рассмотренных случаях, как для продольных (рисунок 111, г) так и для поперечных волн (рисунок 112, г), при этом амплитуда их относительно невысока по сравнению с падающей волной. Причиной низкой амплитуды отраженных волн является малая площадь, на которой формируется отражение, однако сильный акустический контраст между соляными породами и воздухом позволяет уверенно выделять полезный сигнал.

Положительные результаты численного моделирования позволили сделать вывод, о перспективности исследований ширины и физических свойств ГЦ с помощью шахтной сейсморазведки. Следующим этапом стало физическое моделирование – натурные исследования в реальных горно-геологических условиях.

Физическое моделирование. Полевые наблюдения проводились с использованием двух типов волн – продольных и поперечных. Для этого применялись два типа датчиков в сочетании с двумя направлениями источника упругих волн. Вертикально-ориентированные сейсмоприемники, нацеленные на регистрацию отражений от противоположной границы целика на поперечных волнах, устанавливались на стену штрека на креплениях в виде уголков, а возбуждение упругих колебаний выполнялись вертикальными ударами в кровлю выработки (рисунок 113, а). Горизонтально-ориентированные сейсмоприемники, нацеленные на регистрацию отражений от границ целика на продольных волнах, также устанавливались на стену в те же самые отверстия, но на прямых штырях, возбуждение упругих колебаний выполнялось горизонтальными ударами кувалды (рисунок 113, б).

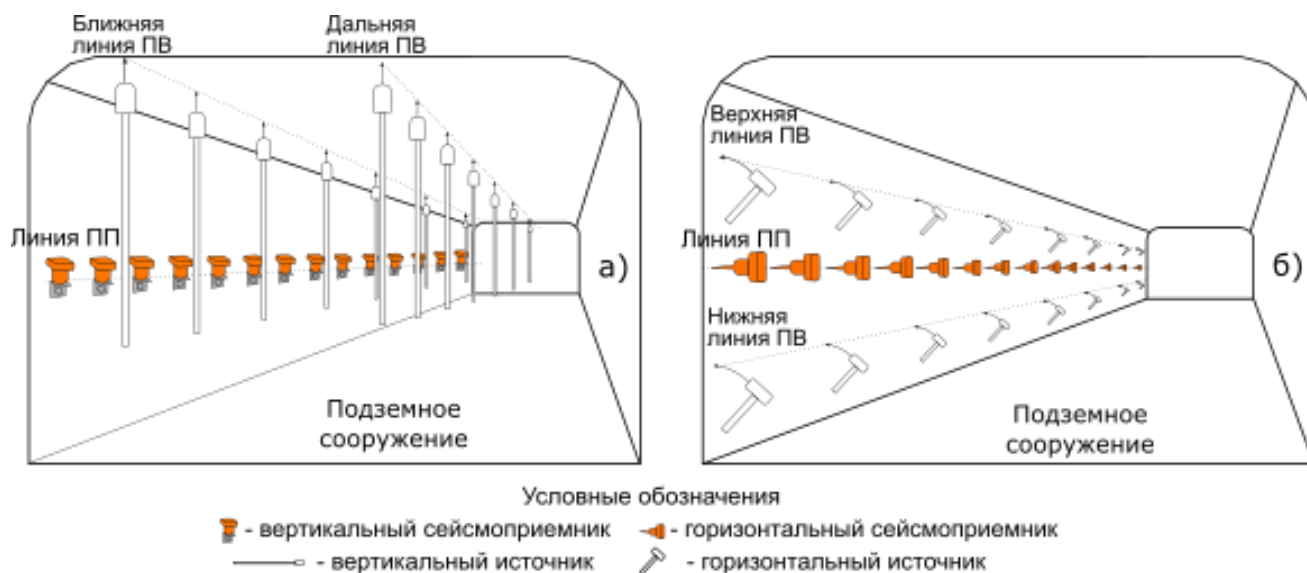


Рисунок 113 – Схема наблюдений в горизонтальной плоскости: а – на поперечных волнах; б – на продольных волнах (по данным автора [217])

И в первом, и во втором случае работы выполнены по двум линиям пунктов возбуждения (ПВ). В результате сформированы два набора данных, в которых одноименные отражения сдвинуты друг относительно друга на соответствующее время. Это позволило определить направление прихода отраженных волн, а при необходимости их можно разделить разработанным в АО «ВНИИ Галургии» способом [102, 191].

Для системы наблюдений на основе теоретических положений и практических результатов выбраны следующие параметры: расстояние между пунктами приема ППр – 2 м, расстояние между ПВ – 4 м, расстояние между линиями пунктов возбуждения – порядка 1,5 м, число накоплений – 5, максимальное расстояние между пунктом возбуждения и пунктом приема – от 126 до 190 м, число каналов от 64 до 96, длина записи – 512 мс, шаг дискретизации 0,25 мс, система наблюдений переменная – от фланговой до центральной.

Результаты натурных исследований. В ходе выполнения натурных исследований получены полевые материалы, на которых зафиксированы годографы прямых, отраженных и дифрагированных волн. При выполнении наблюдений с использованием горизонтально-ориентированных сейсмоприемников получены сейсмограммы, на которых отмечается большое

количество высокоамплитудных отражений от границ ИГЭ на поперечных волнах, приходящих в вертикальной плоскости из верхнего и нижнего полупространств (рисунок 114, а). Среди указанных отражений выделяется меньшее по амплитуде целевое отражение на продольных волнах, пришедшее в горизонтальной плоскости от восточной границы ГЦ. Таким образом данные, полученные с горизонтальными приемниками и горизонтальным источником позволяют контролировать не только параметры целика, но и строение водозащитной толщи на исследуемом участке.

При выполнении наблюдений с вертикально-ориентированными сейсмоприемниками получены сейсмограммы, на которых отмечается лишь одно контрастное отражение – от восточной границы ГЦ, оно характеризуется скоростью поперечных волн 2500 м/с (рисунок 114, б). Данная ситуация позволяет получить качественные разрезы на поперечных волнах в горизонтальной плоскости, на которых не будет интерференции интенсивных отражений не целевого типа.

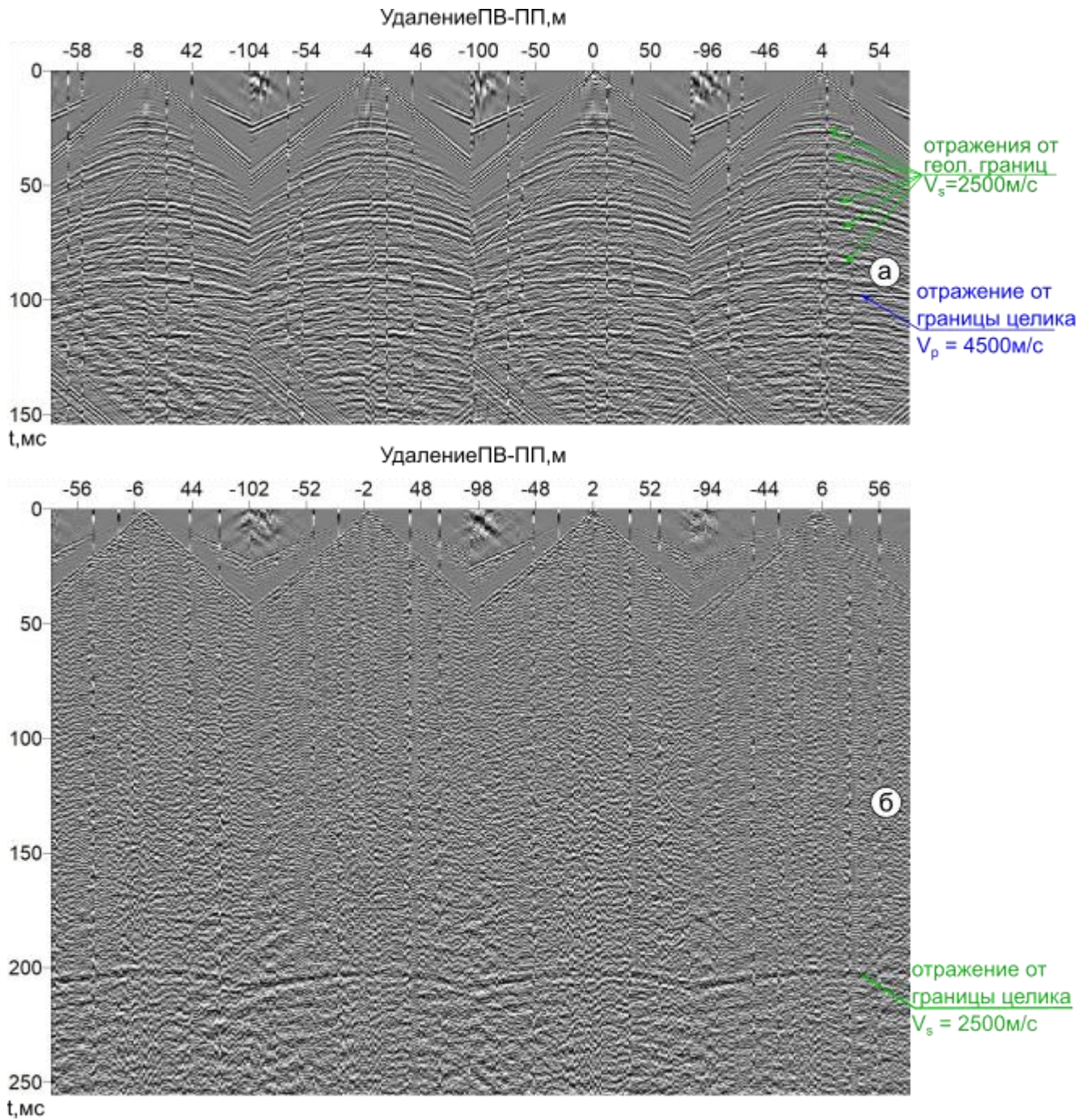


Рисунок 114 – Сейсмограммы, зарегистрированные: а – горизонтальными сейсмоприемниками при горизонтальных ударах; б – вертикальными сейсмоприемниками при вертикальных ударах. Применена полосовая фильтрация и регулировка амплитуд. Отражение от выработок в горизонтальной плоскости зафиксировано на продольных волнах (по данным автора [217])

Обработка полученных сейсмограмм выполнена с учетом методики обработки, принятой в методе ПВРО, согласно которой используются в основном «легковесные» обрабатывающие процедуры, не приводящие к значительным

искажениям записей [206]. Обработка позволила получить глубинные разрезы в горизонтальной плоскости на продольных и на поперечных волнах. Как и ожидалось, разрезы на продольных волнах содержат не только отражения от выработок в горизонтальной плоскости, но и не до конца подавленные отражения на поперечных волнах от геологических границ (рисунок 115, а, б, в). Однако, высокая акустическая контрастность границы соль/воздух, высокая кратность наблюдений, частичное затухание поперечных волн, и соответствующая обработка все же позволяют выделить целевые отражения от противоположной границы ГЦ на продольных волнах.

На разрезах для поперечных волн, полученных с вертикальными сейсмоприемниками, целевые отражения значительно контрастнее, чем на разрезах для продольных волн (рисунок 115, г, д, е). Также отмечаются отражения и от геологических границ, однако их интенсивность значительно меньше, чем интенсивность целевого отражения от противоположной границы ГЦ. Причина появления отражений от геологических границ заключается в том, что выработка, в которой пройден опытно-методический профиль, узкая, и кровля имеет сводообразную форму, без плоского участка. Очевидно, что упругие волны в случае возбуждения колебаний в сводообразную кровлю имеют более широкую апертуру, чем при возбуждении в плоскую, что и приводит к появлению слабых отражений от геологических границ.

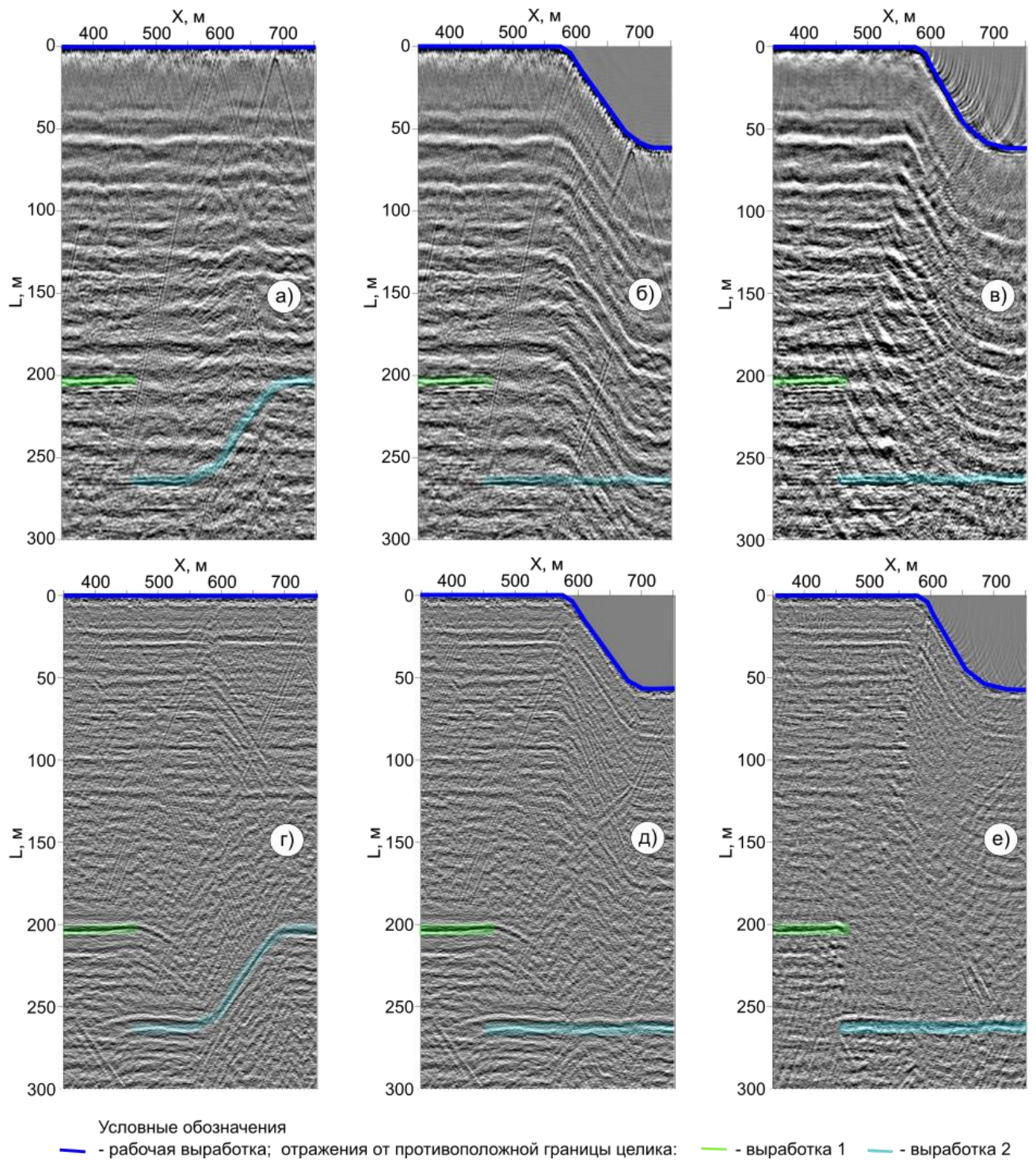


Рисунок 115 – Глубинные разрезы: а, б, в – в горизонтальной плоскости на продольных волнах, г, д, е – в вертикальной плоскости на поперечных волнах. а, г – до коррекции кривизны профиля; б, д – после коррекции кривизны профиля; в, е – после миграции (по данным автора [217])

Сопоставление глубинных сейсмических разрезов с планом горных работ указывает на их высокую сходимость – целевые отражения совпадают с

соответствующими им горными выработками, несмотря на сложную конфигурацию линии профиля (рисунок 116). Таким образом, и теоретические расчеты, и натурные исследования подтверждают высокую эффективность шахтной сейсморазведки при решении задачи определения ширины целика, в том числе в мониторинговом режиме.

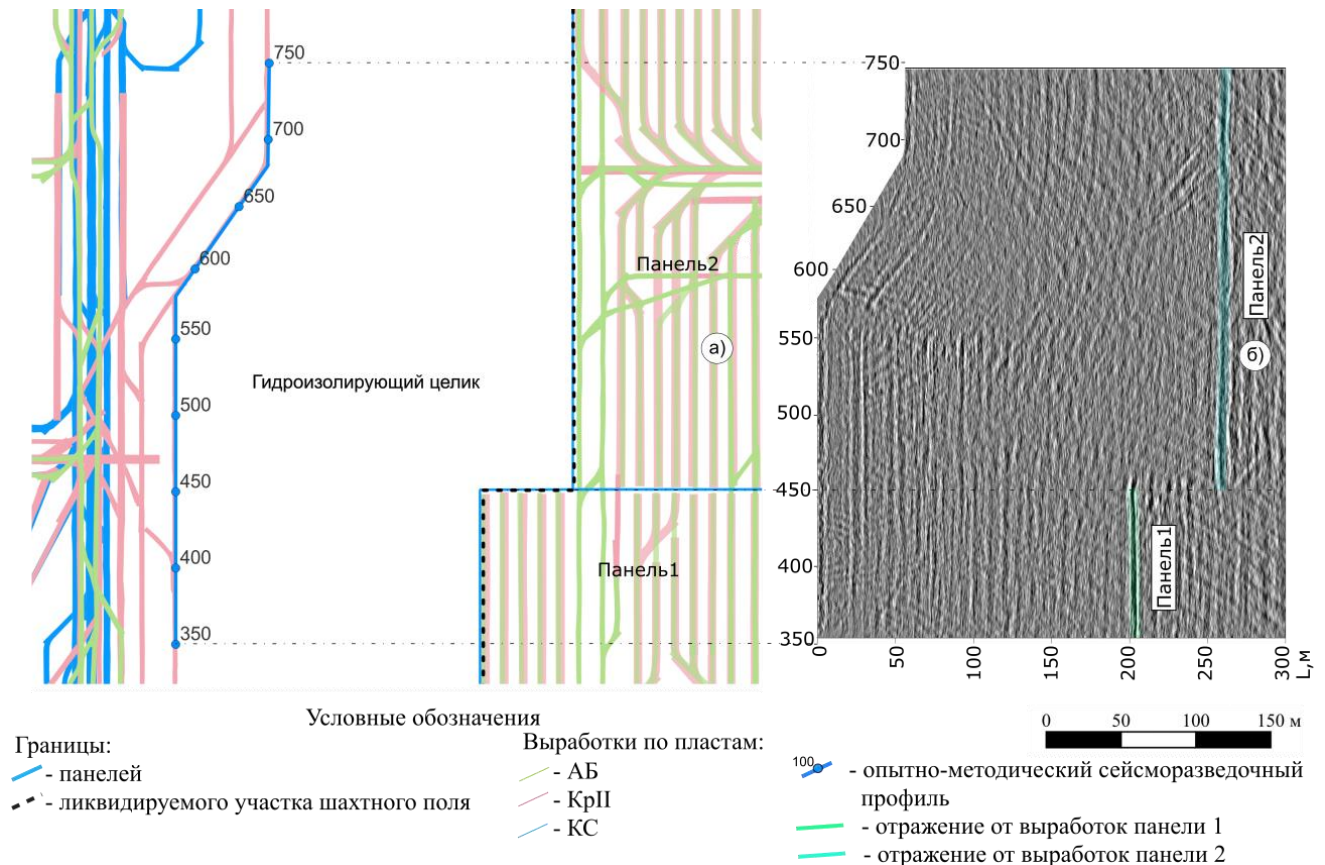


Рисунок 116 – План участка натурных исследований (а) и сейсмический разрез на поперечных волнах в горизонтальной плоскости (б) (по данным автора [217])

Сейсмические данные также несут с собой информацию о физических свойствах пород, через которые проходят упругие волны. В частности, к таким свойствам относятся скорости распространения продольных и поперечных волн, которые, во-первых, коррелируют с плотностью пород, а во-вторых – позволяют перейти к физико-механическим характеристикам на основе уравнений теории упругости [162, 181]. Скорости упругих волн можно получить двумя путями. Первый путь – зная время распространения упругой волны и точное положение

выработок в пространстве, можно вычислить среднюю скорость по простой формуле: $V_{\text{ср}} = \frac{2L}{t_0}$, где L – ширина целика, t_0 – двойное время пробега отраженной волны. Второй путь – оценка скоростей упругих волн путем подбора теоретических годографов по реальным сейсмограммам.

Известно, что погрешность определения скоростей на основе маркшейдерской информации и времени прихода волн составляет единицы процентов, в то время как погрешность оценки скоростей путем подбора теоретических годографов оценивается в 15 % и более. В этой связи на первом этапе наблюдений, т.е. для оценки фонового состояния массива, оценку физических и физико-механических свойств целика необходимо выполнять с использованием скоростей, полученных первым путем. Согласно этому способу, на этапе интерпретации в каждой точке ОГТ прослеживаются отражения от противоположной границы целика, в этих же точках определяется ширина целика, а затем вычисляются средние скорости. Однако, как только ширина целика начнет уменьшаться, погрешность данного способа начнет увеличиваться, в связи с чем, на втором и последующих этапах, возможно, более перспективным будет способ, основанный на подборе теоретических годографов. В любом случае очевидно, что информация, содержащаяся в получаемых сейсмических данных, с той или иной погрешностью позволяет осуществлять мониторинг не только ширины целиков, но и их физических свойств.

Выводы по результатам моделирования. На основе численного моделирования показана теоретическая возможность изучения целиков на месторождении солей с помощью отраженных волн. Отражения фиксируются как на продольных, так и на поперечных волнах, что открывает возможность контролировать ширину и физические характеристики целиков.

Натурные исследования подтверждают результаты моделирования – на полевых записях и на сейсмических разрезах фиксируются хорошо различимые отражения от края целика, и на продольных и поперечных волнах. Материалы на поперечных волнах содержат меньше волн помех, отражение от края целика является высококонтрастным. Материалы, используемые для построения разрезов

целиков на продольных волнах, содержат большее количество волн-помех, однако, позволяют дополнительно на поперечных волнах построить разрез в вертикальной плоскости, который отражает строение водозащитной толщи. Поскольку информативными являются оба типа волн, методика позволяет выполнить переход от скоростей распространения упругих волн к физико-механическим характеристикам пород горного массива.

Таким образом, предлагаемая технология геофизических исследований является эффективной для решения комплексной задачи мониторинга ширины, физических и физико-механических характеристик горных пород, слагающих гидроизолирующие целики, и одновременного контроля за состоянием водозащитной толщи. Внедрение методики в практику горного производства обеспечит горно-геологические службы рудников указанной информацией, что позволит принимать своевременные решения, объективно соответствующие ситуации, и способствующие сохранению устойчивости ПТС в условиях подземной разработки соляных месторождений.

5.3 Оценка и прогноз состояния гидроизолирующих целиков

На основе установленных закономерностей формирования и распространения упругих волн в гидроизолирующих целиках и сформированной на их базе технологии геофизических исследований, в целях оценки устойчивости ПТС и повышения безопасности строительства и эксплуатации сооружений в условиях подземной разработки соляных месторождений, разработана методика прогноза состояния гидроизолирующих целиков. Она основана на комплексном мониторинге физических характеристик горного массива, получаемых по результатам шахтной сейсморазведки ПВРО в горизонтальной плоскости (рисунок 117). Инженерно-геофизическая модель гидроизолирующего целика включает в себя следующую информацию – ширину целика, атрибутивную модель целика – распределение в массиве, слагающем целик, скоростей продольных волн, скоростей поперечных волн, и суммарного сейсмического атрибута, и физико-механическую модель целика, описывающую распределение модулей упругости, сдвига и коэффициента Пуассона.

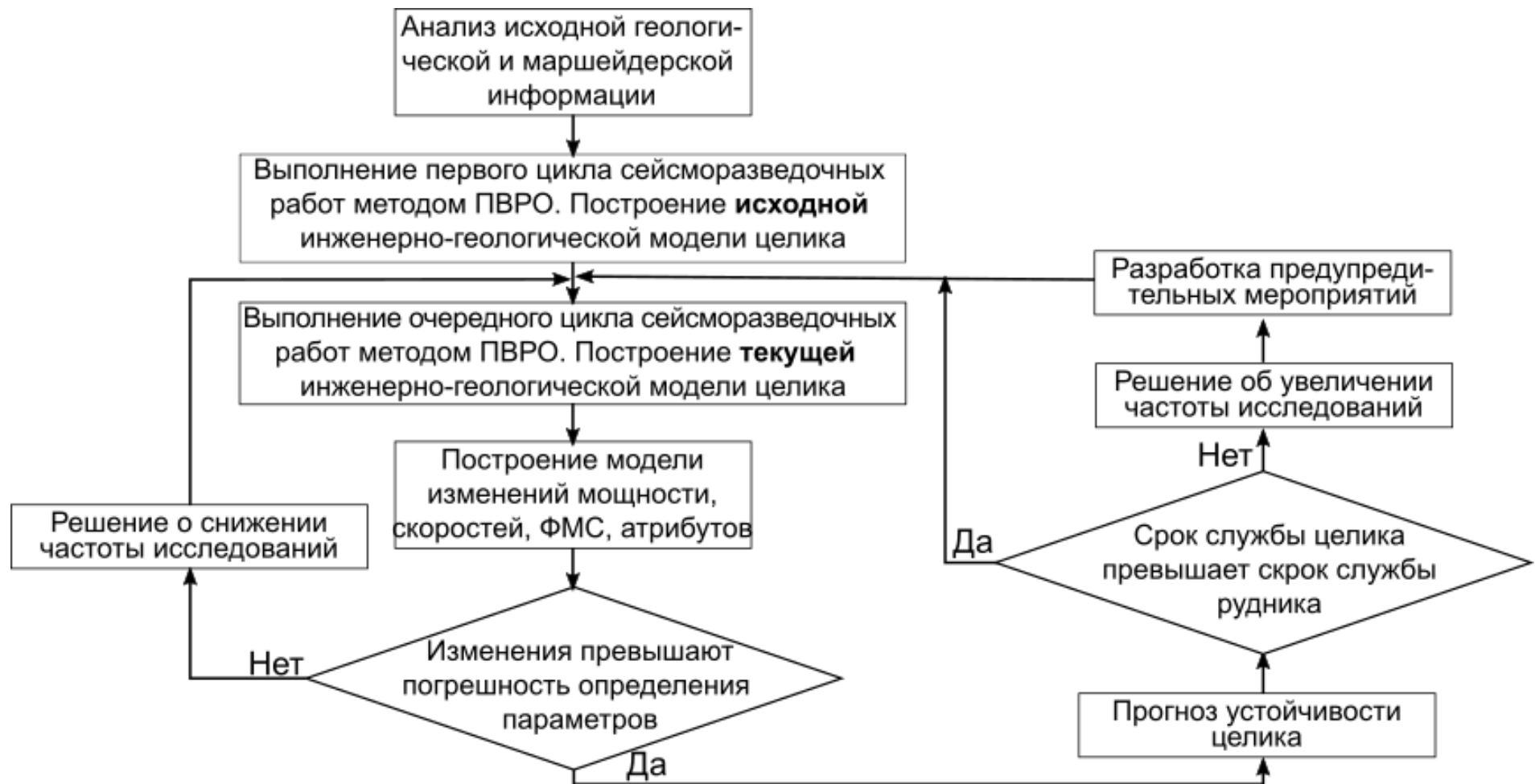


Рисунок 117 – Методика комплексного изучения и мониторинга гидроизолирующих целиков (по данным автора [214])

На первом этапе мониторинга выполняется анализ исходной геологической и маркшейдерской информации, после чего проводится первый цикл шахтной сейсморазведки ПВРО. На основе полученных сейсмических данных строится исходная инженерно-геологическая модель гидроизолирующего целика. Далее, по мере необходимости или согласно принятой программе работ выполняются очередные циклы шахтных сейсморазведочных работ, по итогам которых выполняется построение текущих инженерно-геологических моделей гидроизолирующего целика. Текущие модели сравниваются с исходной, на основании чего формируется модель изменений характеристик исследуемого целика – мощности, скоростей упругих волн, физико-механических свойств и сейсмических атрибутов.

В случае, если изменения не превышают погрешность определения указанных параметров, возможно принятие решения о снижении частоты исследований. В обратном случае выполняется прогноз состояния ГЦ, оценивается срок его службы, принимается решение о необходимости увеличения частоты исследований и разработке предупредительных мероприятий.

Для реализации описанной методики выполнена адаптация разработанного высокоразрешающего метода шахтной сейсморазведки ПВРО к условиям работы в горизонтальной плоскости и на двух типах волн – на продольных и поперечных. В рамках адаптации на основе результатов численного и физического моделирования вся система наблюдения развернута на 90^0 – для исследований на поперечных волнах применяются вертикально-ориентированные сейсмоприемники, устанавливаемые на креплениях на стену выработки, и вертикально-ориентированный источник упругих колебаний, воздействующий на кровлю выработки (рисунок 118, а), а для исследований на продольных волнах используются горизонтально-ориентированные сейсмоприемники с установкой в стену выработки на прямых ножках, и горизонтально-ориентированный источник упругих колебаний, воздействующий на стену выработки (рисунок 118, б). В обоих случаях наблюдения проводятся с двумя линиями возбуждения для идентификации отражений, приходящих из разных полупространств.

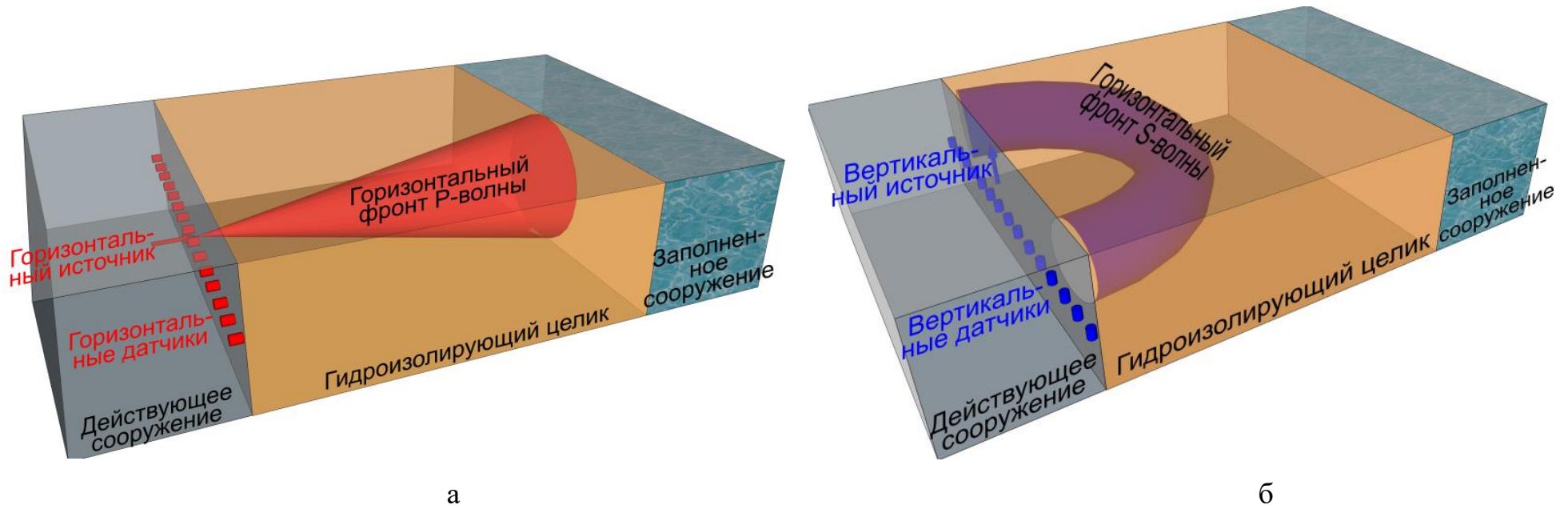
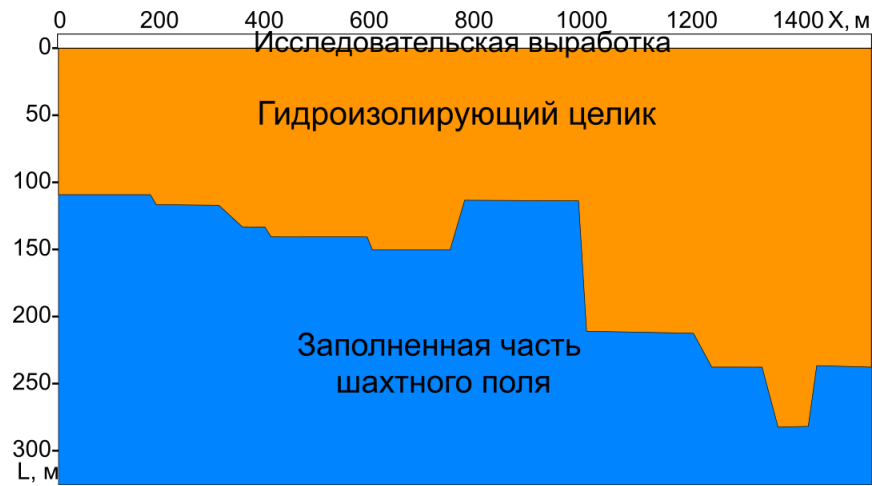


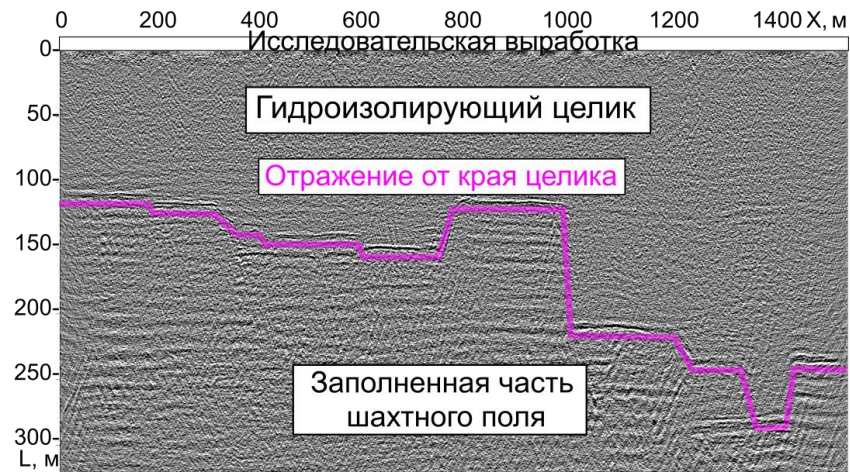
Рисунок 118 – Схема геофизических исследований ширины и свойств гидроизолирующего целика на продольных (а) и на поперечных волнах (б) (по данным автора)

По результатам практической апробации адаптированной методики полевых работ подтверждены выводы, сделанные по результатам численного и физического моделирования – на обоих типах волн регистрируются отчетливые отражения от противоположной границы целиков (рисунок 119, б), соответствующие априорной модели, построенной по данным маркшейдерских наблюдений (рисунок 119, а). По итогам прослеживания отражения от противоположной границы гидроизолирующего целика и сопоставления его формы с априорной моделью выполняется построение структурной модели целика, или карты его ширины (рисунок 119, в). Оценка точности структурных построений показывает, что ширина целика определяется шахтной сейсморазведкой с очень высокой надежностью – коэффициент корреляции между априорной и инженерно–геофизической моделями близок к единице (рисунок 119, г).

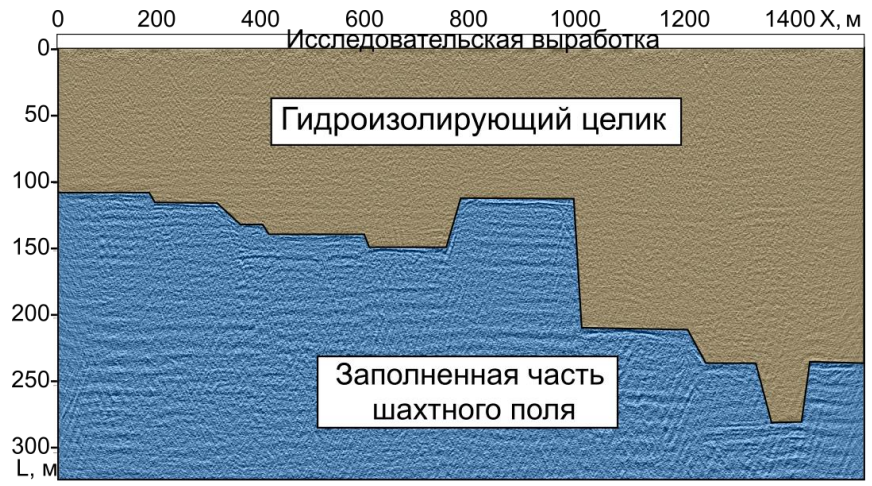
В случае использования горизонтально-ориентированных приемников одновременно с отражениями на продольных волнах от границы целика, фиксируются и отражения на поперечных волнах от геологических границ в вертикальной плоскости. Данный факт несколько осложняет выделение отражений от границ целика, но не препятствует этому полностью. Основным способом борьбы с отражениями от геологических границ на поперечных волнах является подход, при котором на сейсмограммах вычитаются оси синфазности со скоростью поперечных волн. Наличие отражений и на продольных и на поперечных волнах позволяет, в свою очередь, помимо построения структурной модели целика, или, иначе говоря, карты его ширины, выполнить оценку скоростей упругих волн и построить карты их пространственного распределения (рисунок 120 а, б). Оценка скоростей выполняется двумя способами – известными в сейсморазведке способами скоростного анализа обработанных сейсмограмм [34, 38] и по формуле $L=H/2t_0$, где H – ширина целика, t_0 – двойное время пробега упругой волны от линии наблюдения до границы целика и обратно.



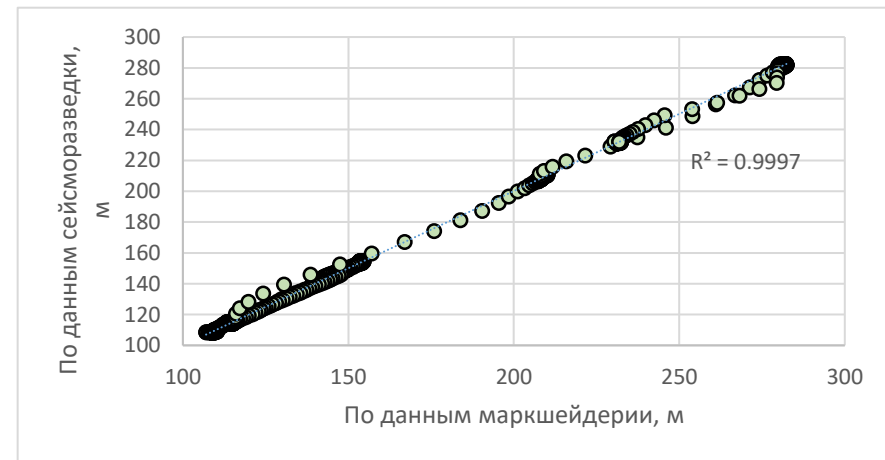
а



б



в



г

Рисунок 119 – Карта ширины целика по данным маркшейдерии (а), результаты шахтной сейсморазведки ПВРО (б), структурная модель (карта мощности) целика (в), оценка точности структурных построений (г) (по данным автора)

Помимо оценки скоростей упругих волн и построения карт их распределения, выполняется атрибутный анализ в интервале между поверхностью наблюдения и отражением от противоположной границы целика. По результатам атрибутного анализа выполняется построение карты суммарного сейсмического атрибута, которая позволяет установить наличие или отсутствие нарушений сплошности целика (рисунок 120, в).

Суммарный сейсмический атрибут реагирует на такие изменения характеристик сейсмического сигнала, которые могут быть незаметны при изучении сейсмических разрезов «невооруженным» взглядом, и поэтому позволяет выявить признаки нарушения сплошности целика еще до их явного проявления в сейсмическом поле или, например, в виде трещин и течи рассолов. На данный момент величина суммарного сейсмического атрибута, сигнализирующая о наличии нарушений в массиве, достоверно не определена ввиду отсутствия целиков с нарушениями, установленными прямыми способами. Поэтому на момент написания данной работы атрибутный анализ носит качественный характер, в предположении, что, нарушения сплошности фиксируются по значениям суммарного сейсмического атрибута от 0.7 и более.

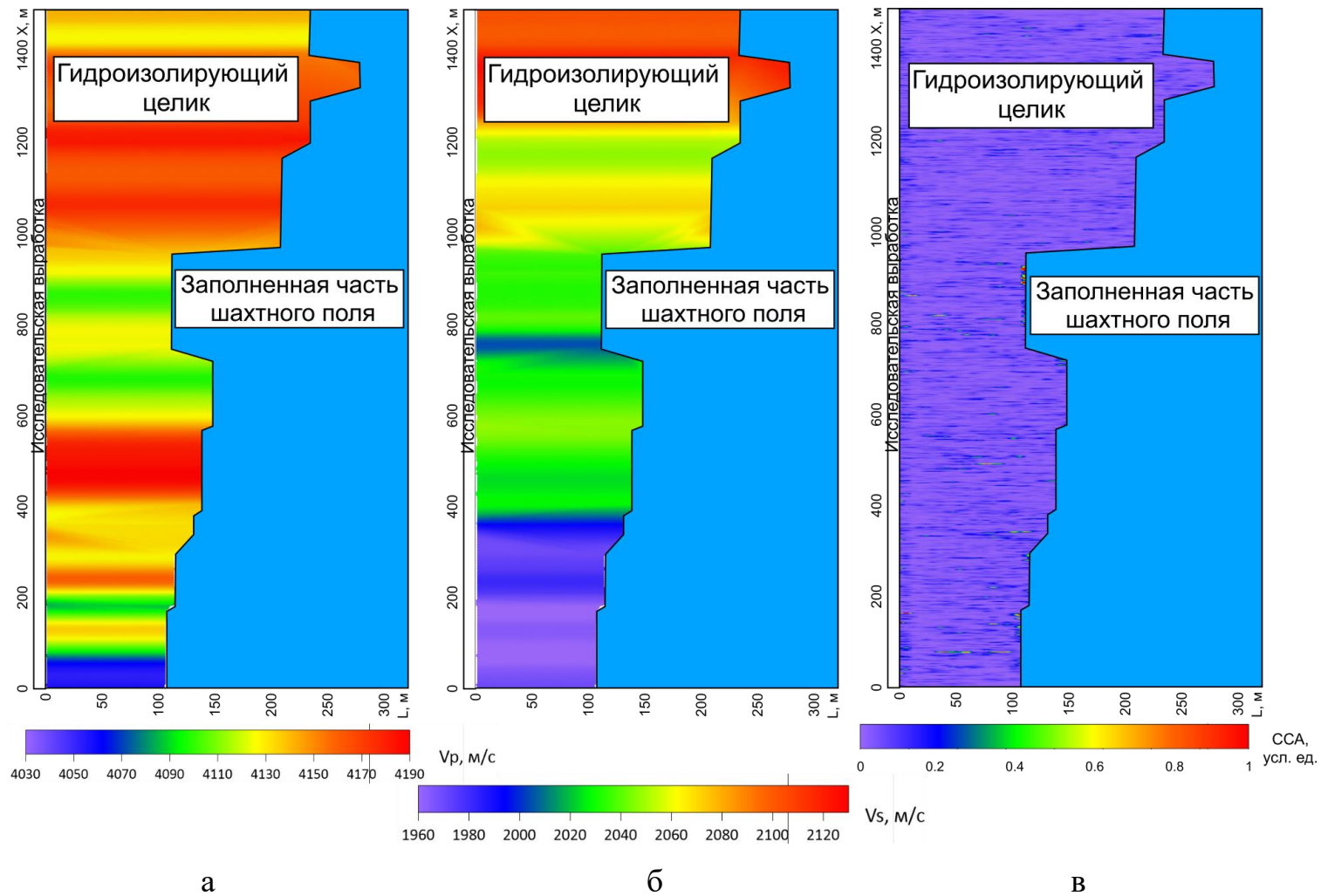


Рисунок 120 – Атрибутная модель гидроизолирующего целика, карты распределения: а – скоростей продольных волн, б – поперечных волн, в – суммарного сейсмического атрибута (по данным автора)

Совместное использование продольных и поперечных волн открывает возможность для расчета физико-механических свойств слагающего целик горного массива с использованием формул теории упругости [162, 181] и корреляционных связей, полученных другими исследователями [37, 58, 60, 158, 311]. На основе теории упругости рассчитываются модули упругости, сдвига, всестороннего сжатия и коэффициент Пуассона (рисунок 121). Формула расчета коэффициента Пуассона:

$$\nu = \frac{3\lambda - 2}{2(3\lambda + 1)}, \quad (59)$$

$$\lambda = \frac{V_p^2}{V_s^2}, \quad (60)$$

где V_p – скорость распространения продольных волн, V_s – скорость распространения поперечных волн.

Формула расчета модуля сдвига:

$$G = \rho V_s^2, \quad (61)$$

где ρ – плотность пород, для солей принимается табличное значение 1.9 г/см^3 .

Объемный модуль упругости рассчитывается следующим образом:

$$K = \rho V_p^2, \quad (62)$$

Модуль Юнга (модуль упругости) определяется как

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (63)$$

Пример физико-механической модели целика, структурная и атрибутивная модели которой представлены выше (рисунок 120), показан ниже (рисунок 121). По картам физмехсвойств видно, что пределы их изменения незначительны – в пределах 5–7% относительно среднего значения, что говорит о достаточно равномерном пространственном распределении свойств в пределах массива, слагающего гидроизолирующий целик. Это указывает на удовлетворительное состояние целика, отсутствие в его пределах ослабленных зон, и способность выполнять свои основные функции – поддерживать толщу пород в устойчивом состоянии и препятствовать проникновению флюидов в действующие подземные сооружения.

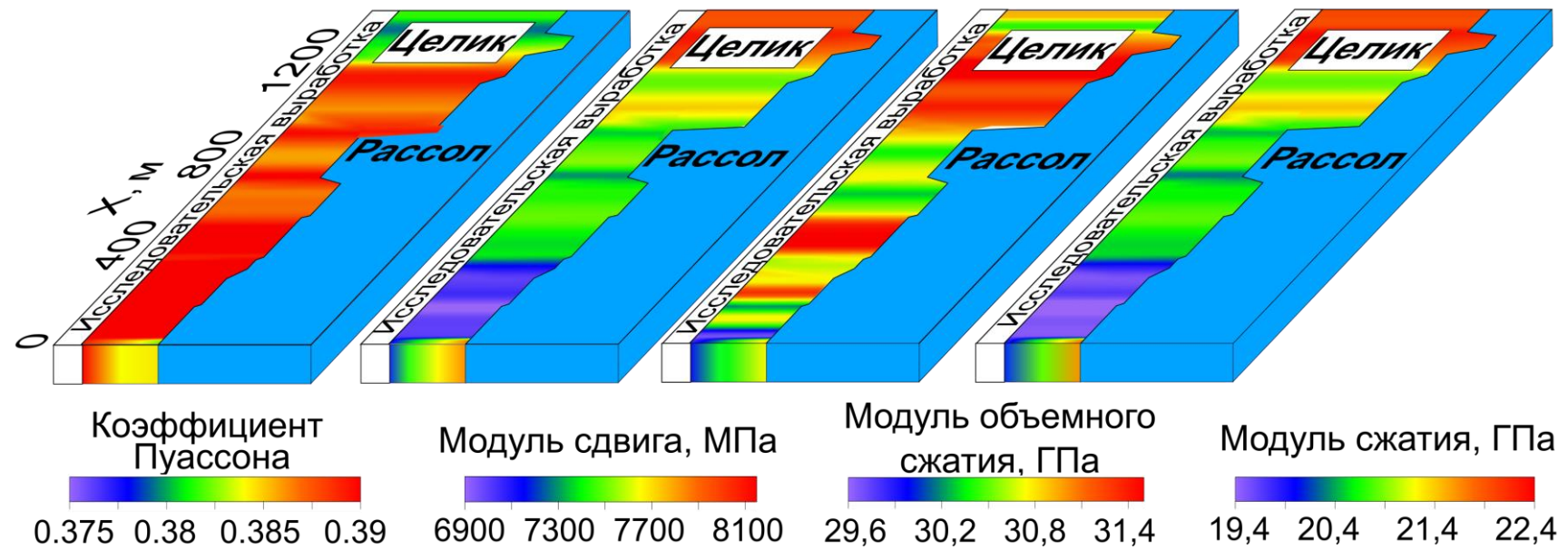


Рисунок 121 – Физико-механическая модель гидроизолирующего целика, полученная на основе пересчета сейсмических атрибутов (по данным автора [214])

Мониторинг изменения ширины и свойств гидроизолирующего целика выполняется путем оценки относительного изменения каждой из характеристик, входящей в инженерно-геофизическую модель:

$$\Delta P_{x,h,n} = (P_{x,h,n} - P_{x,h,1}) / P_{x,h,1} \times 100\%, \quad (64)$$

где $\Delta P_{x,h,n}$ – изменение характеристик целика на разных этапах мониторинга; $P_{x,h,n}$ – значение физической характеристики на текущем этапе мониторинга; $P_{x,h,1}$ – то же, на первом этапе мониторинга.

Изменения с течением времени характеристик, входящих в инженерно-геологическую модель, требуют внимания в случае превышения погрешности их определения. «Базовыми» являются погрешности определения ширины целика и скорости распространения упругих волн, погрешности определения остальных величин являются производными от базовых.

Наиболее важной характеристикой, которая несет понятный физический смысл, при мониторинге является ширина целика. Погрешность определения расстояния в сейсморазведке зависит от точности определения скорости в перекрывающей толще, и составляет 3-5% при определении скорости скважинными методами (вертикальное сейсмическое профилирование, акустический каротаж), и порядка 15% при определении скорости по годографам отраженным волн [34]. В случае гидроизолирующих целиков, благодаря маркшейдерским данным о первоначальной ширине целика, погрешность определения скорости соответствует случаю с определением скоростей по скважинным методам, то есть составляет порядка 3-5%. Соответственно, ширина целика и физико-механические свойства горных пород вычисляются с аналогичной погрешностью.

Результаты мониторинговых исследований позволяют сформировать модель изменения характеристик гидроизолирующего целика, включающую в себя вариацию во времени таких характеристик как ширина, скорости продольных и поперечных волн и суммарный сейсмический атрибут (рисунок 122), коэффициент Пуассона, модуль сдвига, модуль упругости и объемный модуль упругости (рисунок 123).

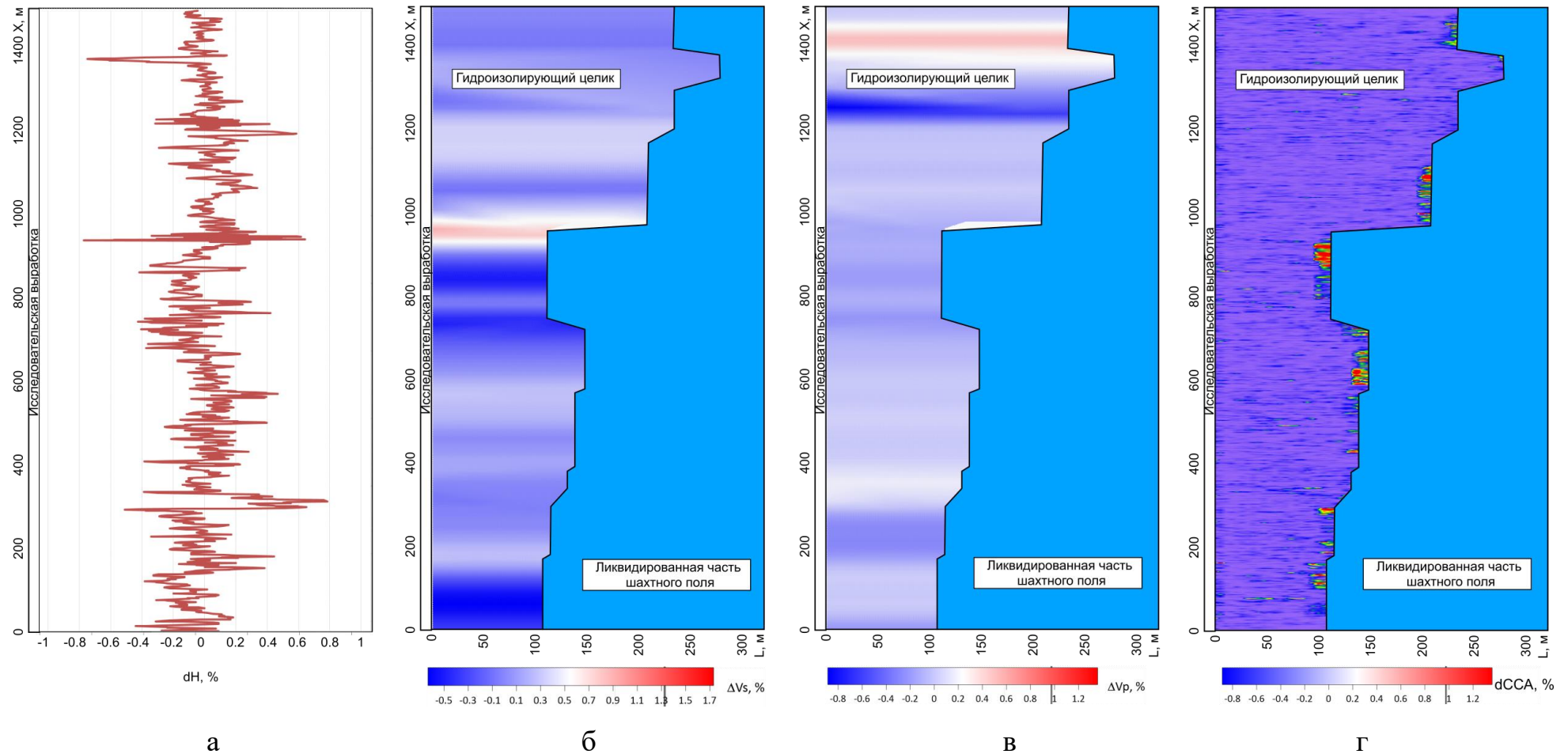


Рисунок 122 – Модель изменений характеристик исследуемого целика – карты относительного изменения: а – мощности, б – скоростей поперечных волн, в – скоростей продольных волн, г – амплитудно-частотных атрибутов (по данным автора)

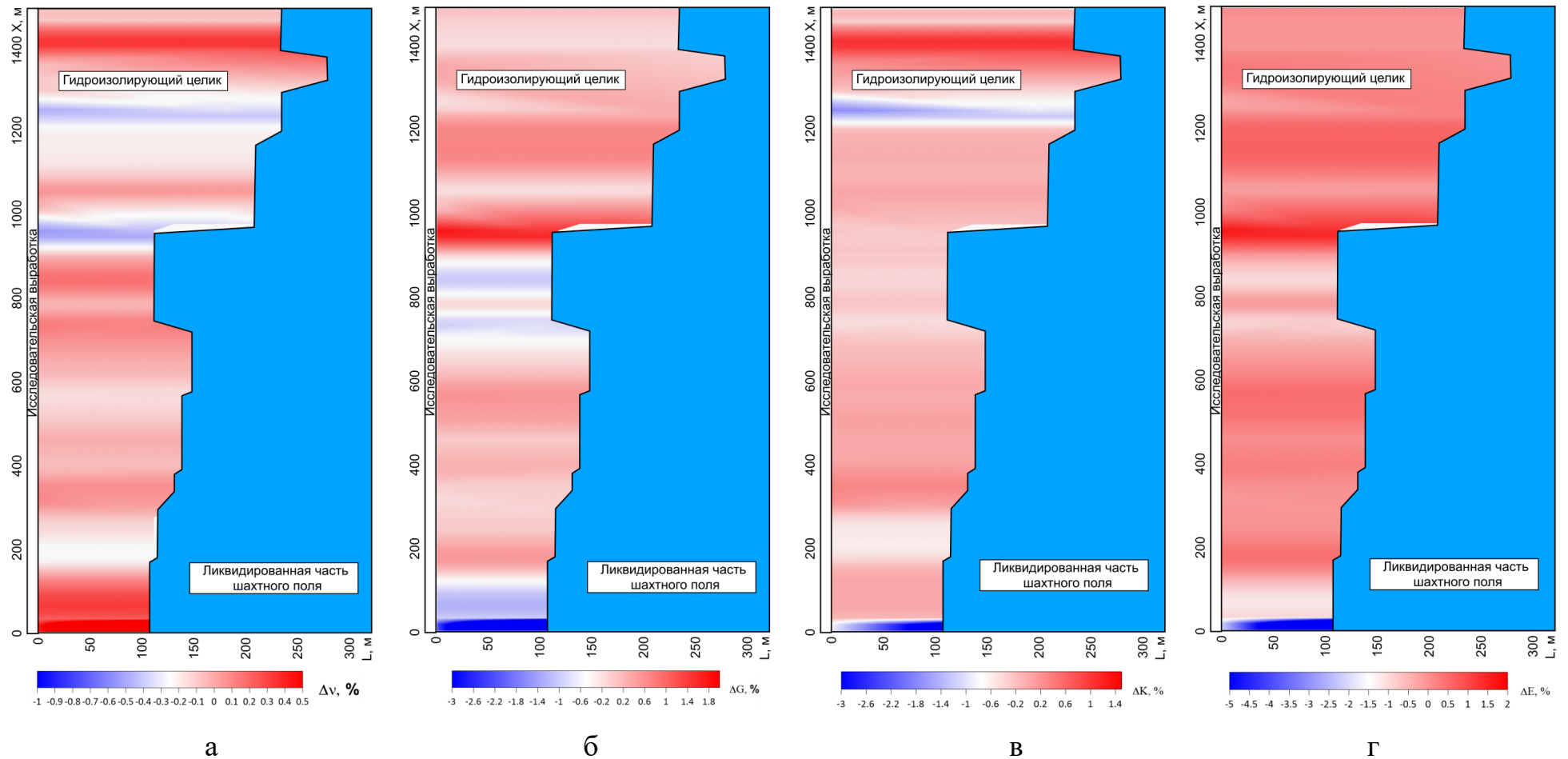


Рисунок 123 – Модель изменений характеристик исследуемого целика – карты относительного изменения: а – коэффициента Пуассона, б – модуля сдвига, в – объемного модуля упругости, г – модуля упругости (по данным автора)

Пример для конкретного гидроизолирующего целика, приведенный выше, показывает, что изменения его характеристик находятся в следующих пределах:

- ширина $< 1\%$ (рисунок 122, а);
- скорости продольных и поперечных волн $< 1\%$ (рисунок 122, б, в);
- суммарный сейсмический атрибут $< 1\%$ (рисунок 122, г);
- коэффициент Пуассона $< 1\%$ (рисунок 123, а);
- модуль сдвига $< 3\%$ (рисунок 123, б);
- объемный модуль упругости $< 3\%$ (рисунок 123, в);
- модуль упругости $< 3\%$ (рисунок 123, г).

Таким образом, в рассматриваемом случае можно сделать заключение, что изменения характеристик целика не превышают пределы погрешностей их определения, и поэтому могут быть признаны несущественными.

Положения теории упругости позволяют вычислять с помощью формул (59) – (63) так называемые динамические модули упругости, при этом в практических целях предпочтительнее использовать статические модули, которые получают путем лабораторных исследований. Статические модули оказываются ближе к реальным характеристикам, чем динамические, поскольку последние, как правило, являются завышенными из-за физических особенностей способов их определения. Для перехода от динамического модуля упругости к статическому предлагается следующий подход. В ходе предыдущих исследований на территории ВКМС была установлена надежная корреляционная связь между скоростью продольных волн в образцах солей и статическим модулем упругости, коэффициент корреляции составил 0.84 (рисунок 124) [158, 311].

Автором предлагается корректировать значения динамического модуля упругости, полученного по результатам анализа сейсмических атрибутов, путем приведения его к уровню статического модуля упругости следующим образом:

1. Расчет динамического модуля упругости $E_{\text{дин}}$ по формуле (63) из теории упругости.
2. Предварительный расчет статического модуля упругости $E_{\text{стат}}$ на основе уравнения регрессии, предлагаемого авторами [158] (рисунок 124).

3. Приведение динамического модуля упругости к уровню статического модуля:

$$E_{\text{дин_привед}} = E_{\text{дин}} - \Delta E, \quad (65)$$

$$\Delta E = E_{\text{дин_ср}} - E_{\text{стат_ср}}, \quad (66)$$

где $E_{\text{дин_ср}}$ – среднее значение динамического модуля упругости по профилю или участку, $E_{\text{стат_ср}}$ – среднее значение статического модуля упругости по профилю или участку.

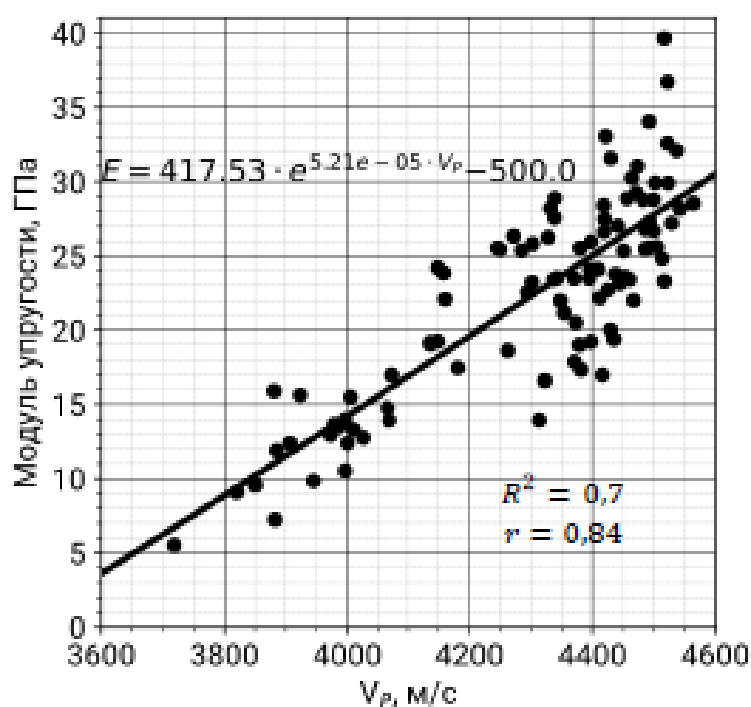


Рисунок 124 – Корреляционная зависимость между скоростью продольных волн в солях и модулем упругости (по данным [158])

Пример результатов приведения динамического модуля упругости к уровню статического модуля упругости на одном из участков исследования гидроизолирующего целика приведен ниже (рисунок 125). На представленном рисунке видно, что среднее значение динамического модуля упругости составляет 20.8 ГПа, в то время как среднее значение статического модуля упругости, полученного с помощью корреляционной зависимости, равно 18 ГПа, то есть фоновая разница составила почти 3 ГПа. Использование формул (64) и (65) позволило привести динамический модуль упругости к нужному уровню, сохранив

при этом все индивидуальные особенности исходного графика, обусловленные свойствами конкретного гидроизолирующего целика.

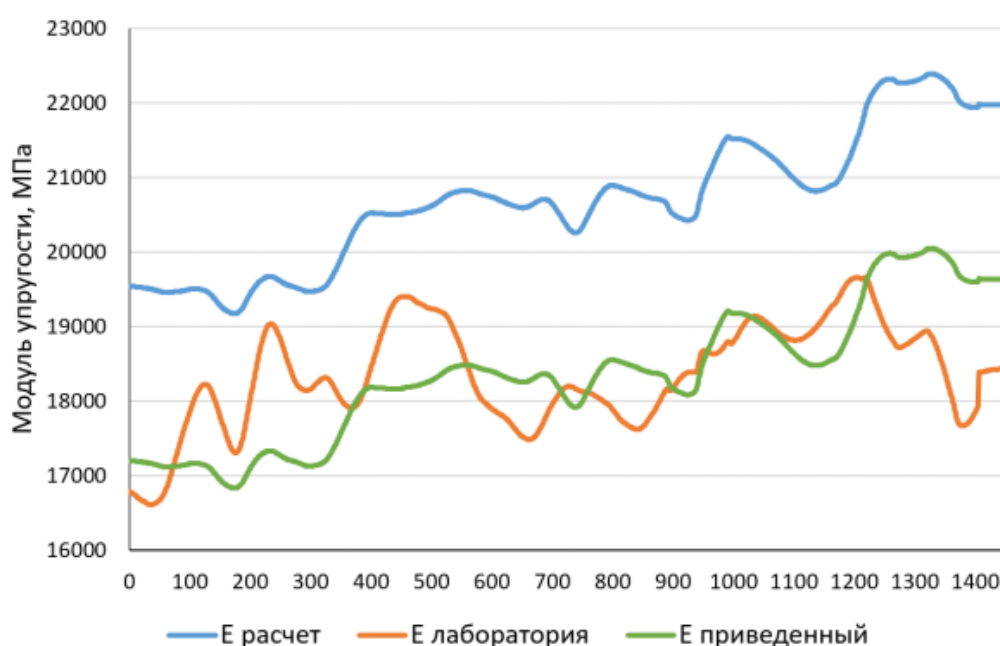


Рисунок 125 – Приведение динамического модуля упругости к уровню статического модуля упругости (по данным автора)

Физико-механические характеристики, полученные на основе сейсмических атрибутов, в том числе скорректированные с учетом результатов предыдущих исследований по формулам (65) и (66), позволяют перейти через корреляционные связи [158] к районированию целика по таким геомеханическим характеристикам горного массива, как предел прочности на сжатие и степень нагружения целика (рисунок 126).

Физический смысл степени нагружения целика и способ его определения рассмотрен в разделе 4.2, поэтому здесь рассмотрим понятия предела прочности на сжатие и минимально допустимой ширины предохранительного гидроизолирующего целика.

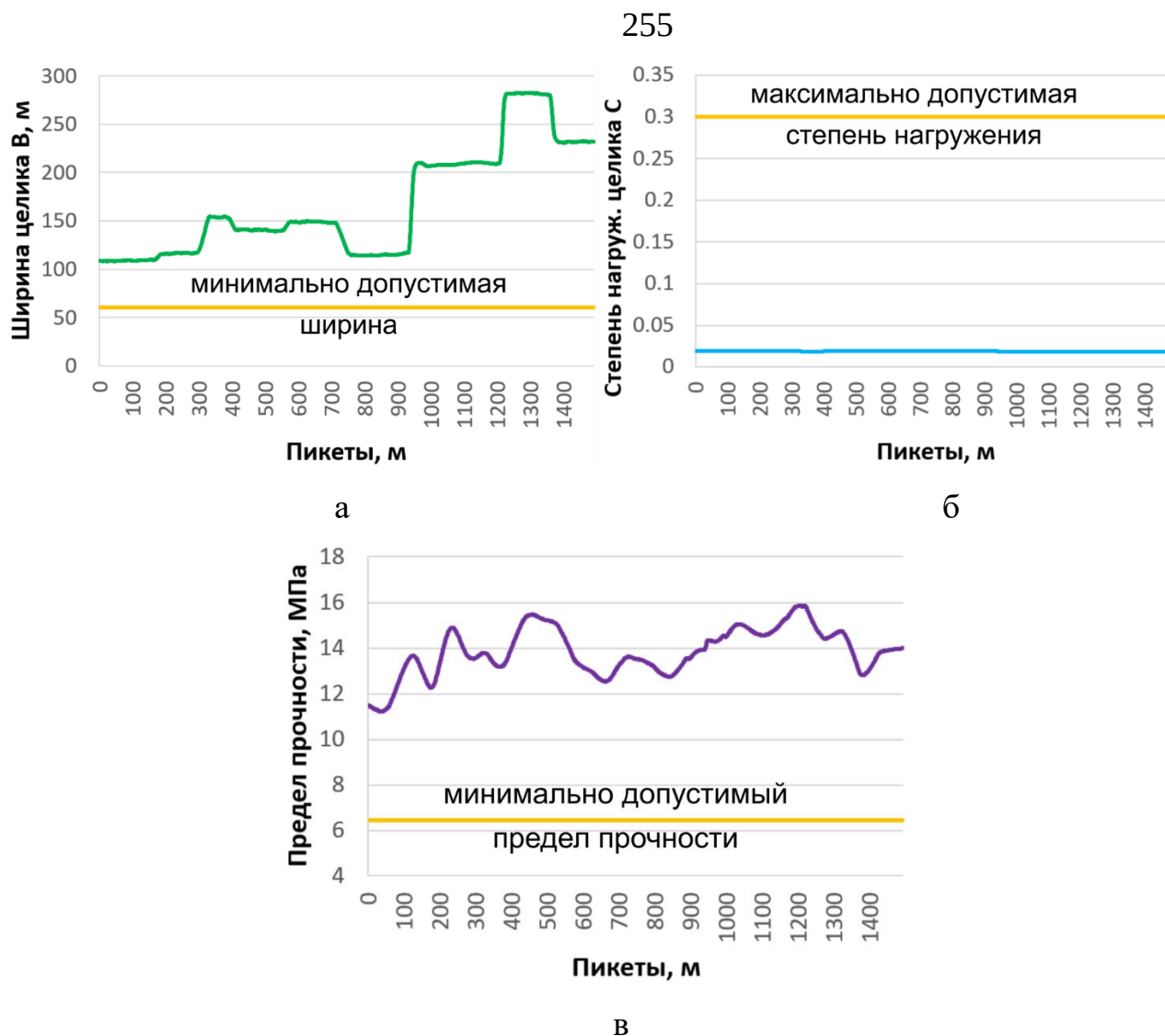


Рисунок 126 – Районирование целика по характеристикам: а – фактическая и минимально допустимая мощности, б – фактическая и максимально допустимая степени нагружения, в – фактический и минимально допустимый предел прочности (по данным автора [214])

Минимально допустимая ширина гидроизолирующих целиков рассчитывается на основе положений нормативных документов, действующих на рудниках Верхнекамского месторождения солей [172, 283], и определяется формулой:

$$B_p = \begin{cases} 2[\operatorname{ctg} \delta (H_v + M_0)] + B_0 + \Delta B_0, \\ 200 \text{ м} \end{cases} \quad (65)$$

где δ – угол сдвиговых нарушений, для условий ВКМС принимается равным 60° , H_v – среднее значение суммарной мощности ВЗТ1 и ВЗТ2 в пределах рассматриваемого участка целика, определяется по данным шахтной

сейсморазведки с учетом геологического разреза скважин, M_0 – расчетная высота выработанного пространства, рассчитывается как разница между глубинами залегания подошвы нижнего и кровли верхнего отрабатываемых пластов, B_0 – предохранительная берма, соответствующая части предохранительного целика, в пределах которой должна обеспечиваться водонепроницаемость пород, принимается равной 25 м, ΔB_0 – возможная погрешность определения кровли водозащитной толщи в пределах ширины верхней части предохранительного целика, принимается равной м.

Предел прочности на сжатие горной породы – это пороговая величина механического напряжения, превысив которую данная порода разрушается или критически деформируется. Для каменной соли прочность при одноосном сжатии варьируется в пределах от 4 до 40 МПа, при этом на прочность соляных пород существенное влияние оказывает время воздействия нагрузки или скорость нагружения образца.

В практике эксплуатации Верхнекамского месторождения солей за минимально допустимый предел прочности на сжатие, или предел длительной прочности $\sigma_{дл}$ принимается значение, равное $0.3\sigma_{сж}$, где $\sigma_{сж}$ – предел прочности на сжатие (рисунок 126, в). Оценка предела прочности на сжатие выполняется согласно уравнению регрессии, полученному ранее при изучении корреляционной зависимости между прочностными характеристиками соляных пород и скоростями распространения в них упругих волн [158, 315] (рисунок 127).

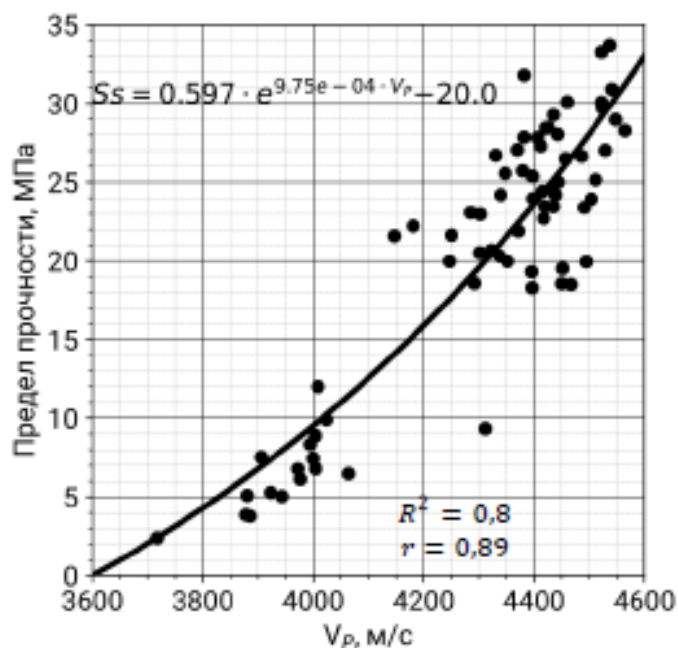


Рисунок 127 – Корреляционная зависимость между пределом прочности и скоростью продольной волны для солей Верхнекамского месторождения солей (по результатам испытаний Пермского национального исследовательского политехнического университета [158])

Совместный анализ указанных характеристик с учетом результатов атрибутивного анализа, измерения ширины целика и сравнения их с предельно допустимыми значениями, позволяет сформировать модель оценки состояния и целика (таблица 8). Данная модель дает полноту понимания о строении и состоянии целика на момент выполнения исследований, достаточную для повышения безопасности эксплуатации сооружений и устойчивости ПТС в условиях подземной разработки соляных месторождений с точки зрения гидроизолирующих целиков. Помимо рассмотренных выше характеристик целика, модель включает в себя факт поступления воды сквозь целик, как очевидный признак нарушения его сплошности. Можно отметить, что из пяти характеристик состояния гидроизолирующего целика четыре определяются с использованием данных шахтной сейсморазведки ПВРО.

Таблица 8 – Модель оценки состояния гидроизолирующего целика

Характеристики состояния ГЦ (для сильвинита)	Состояние целика (сильвиниты)		
	Безопасное	Небезопасное	Критическое
Ширина ГЦ – В, м (по данным сейсморазведки)	$V < V_p$	$V = V_p$	$V > V_p$
Признаки нарушения сплошности (ССА) (по данным сейсморазведки)	$ССА \ll 1$	ССА локально приближается к 1	ССА обширно приближается к 1
Степень нагружения целика С (по данным сейсморазведки)	$C < 0.3$	$C = 0.3$	$C > 0.3$
Значение предела длительной прочности $\sigma_{дл}$ (по данным сейсморазведки)	$\sigma_{дл} > 0.3\sigma_{сж}$	$\sigma_{дл} = 0.3\sigma_{сж}$	$\sigma_{дл} < 0.3\sigma_{сж}$
Поступление воды сквозь целик	Нет	Увлажнение стенок	Поступает вода

Мониторинг изменения геометрических и инженерно-геологических характеристик массивов горных пород между подземными сооружениями, в свою очередь, открывает путь к прогнозу состояния гидроизолирующего целика и устойчивости всей ПТС в целом. Так, на одном из гидроизолирующих целиков мониторинговые сейсморазведочные работы позволили установить факт заметного уменьшения его мощности, которое за четыре года наблюдений достигло на одном из участков девяти метров (рисунок 128). Указанный участок расположен в районе пикета 268 м сейсморазведочного профиля, причем наибольшие изменения произошли уже через два года после начала наблюдений, ширина участка составила порядка сорока метров. Затем, уже через четыре года после начала наблюдений, область изменений значительно расширилась – до двухсот метров. Второй цикл расширения не достиг такой глубины проникновения в целик, как

первоначальная зона нарушения, и составил максимум четыре метра.

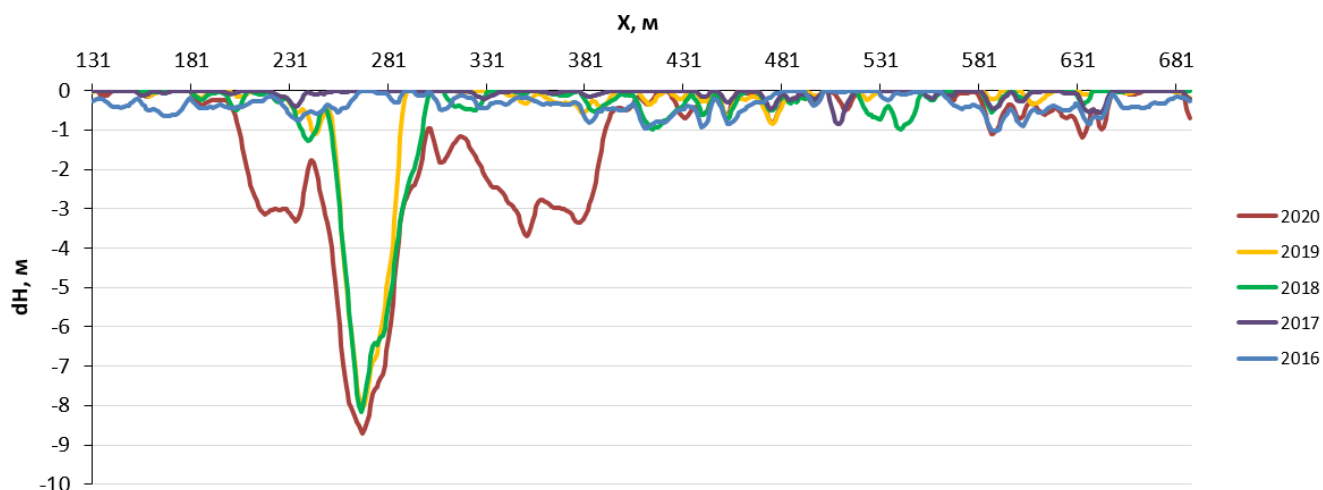


Рисунок 128 – Уменьшение мощности гидроизолирующего целика на одном из участков ВКМС (по данным автора)

Изменение мощности на девять метров заметно превышает погрешность определения геометрических характеристик гидроизолирующего целика, в связи с чем оно должно быть принято во внимание и учтено в прогнозе его состояния. Прогноз состояния выполняется по участку максимальных изменений, в данном случае на пикете 268 (рисунок 129, а). Для кривой, описывающей изменение мощности ГЦ на указанном пикете, на основании метода наименьших квадратов выполняется поиск уравнения линейной регрессии. Далее, с использованием найденного уравнения путем экстраполяции выполняется прогноз изменения предела прочности на сжатие (рисунок 129, б), ширины (рисунок 129, в), и степени его нагружения (рисунок 129, г) на необходимый период, в данном случае прогноз сделан до 2050 года.

В рассмотренном случае можно сделать вывод, что до 2050 года при условии сохранения интенсивности изменений основных параметров целика, его основные характеристики – ширина, степень нагружения и предел прочности на сжатие, сохранятся в допустимых пределах. Выполненный прогноз, с учетом информации о предельно допустимых значениях прогнозируемых характеристик, позволяет оценить перспективы дальнейшей эксплуатации гидроизолирующего целика при сохранении установленных темпов их изменений. В случае, если темпы

изменений изменяются, соответственным образом меняются и прогнозные оценки характеристик целика. Совместный контроль состояния целиков и водозащитной толщи обеспечивает переход к группе сценариев с полным контролем инженерно-геологических условий, и обеспечением управляемого развития состояния всей природно-технической системы «инженерно-геологический массив – подземные сооружения».

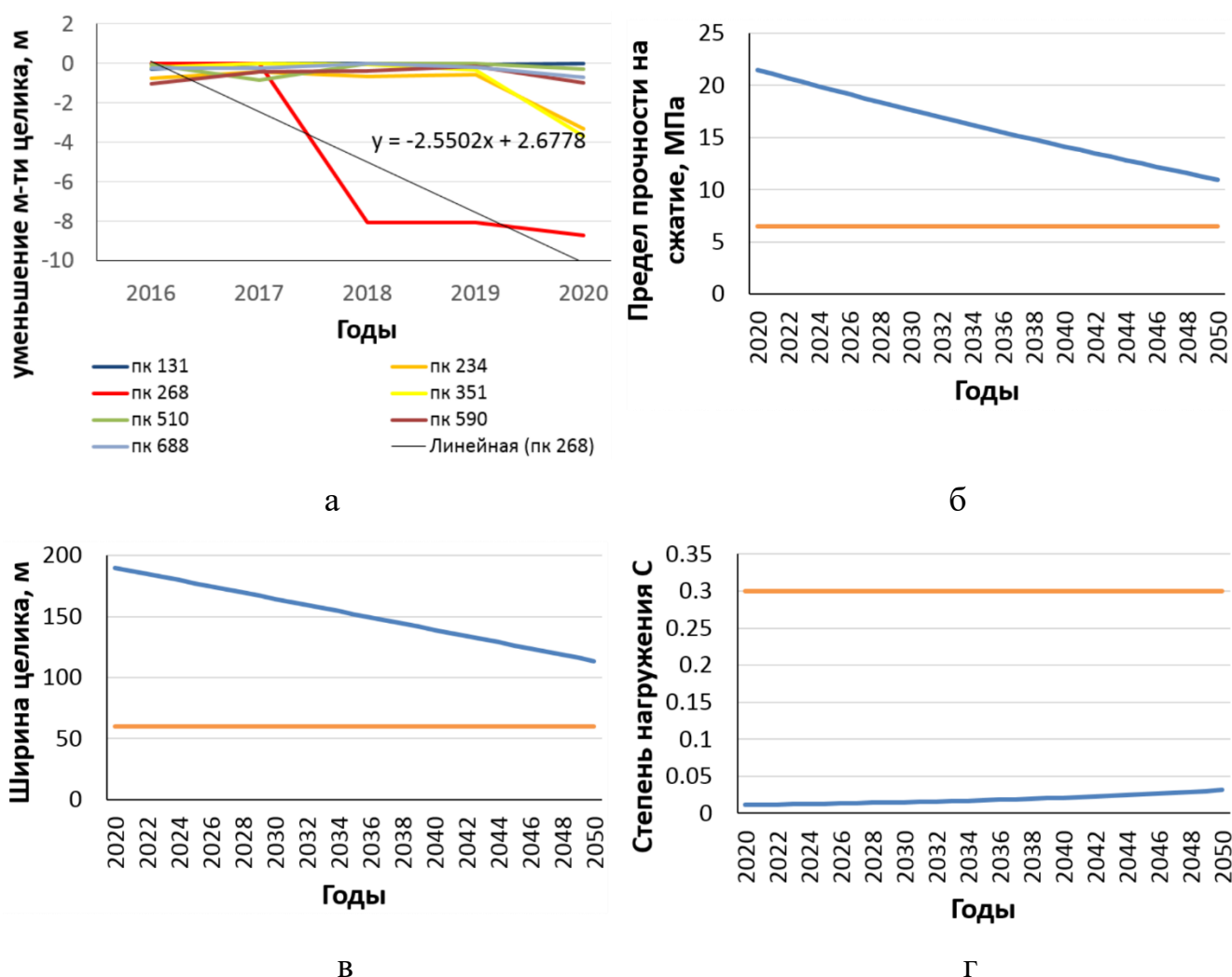


Рисунок 129 – Прогнозная оценка характеристик целика: а – результаты мониторинга целика за период 5 лет, б, в, г – прогнозная оценка характеристик целика на участке наибольших изменений соответственно для предела прочности на сжатие, ширины целика и максимальной степени нагружения (по данным автора [214])

Таким образом, разработана методика детального сейсмического анализа и

мониторинга состояния геотехнических массивов с заданными прочностными, деформационными и гидроизолирующими характеристиками (гидроизолирующих целиков) на основе адаптированного для горизонтальной плоскости метода шахтной сейсморазведки ПВРО с регистрацией продольных и поперечных волн. Методика обеспечивает оценку, мониторинг и прогноз состояния целиков по комплексу характеристик: ширина, упругие константы (коэффициента Пуассона, модулей упругости и сдвига), предел прочности на сжатие и степень нагружения.

ОБОБЩЕНИЕ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Ожидаемый экономический эффект от внедрения результатов диссертационной работы.

Экономическая эффективность разработанных научно-методических основ оценки и прогноза устойчивости природно-технических систем (ПТС) при подземной разработке соляных месторождений складывается из двух составляющих:

1. Предотвращение прямых и косвенных потерь от затопления рудников за счёт своевременного выявления опасных геологических процессов и принятия корректирующих проектных решений.

2. Снижение затрат на проведение шахтных сейсморазведочных работ благодаря использованию высокопроизводительного метода ПВРО.

Рассмотрим данные пункты подробнее.

1. Предотвращение ущерба от аварий на соляных рудниках.

Исторические данные по двум затопленным рудникам Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей показывают масштаб возможных потерь при недостаточно эффективной оценке состояния ВЗТ и гидроизолирующих целиков. Так, оценка потерь от затопления в 1986 году крупнейшего на тот момент в Европе Третьего Березниковского калийного рудника с годовой производительностью 6,0 млн. т., указывает на безвозвратную потерю более 300 млн. т. извлекаемых запасов калийных руд. В руднике оставлено все оборудование и инфраструктура, материальный ущерб составил порядка 300 млн. р. в ценах 1981 г., в эту сумму входят:

- прямые убытки от уничтожения горного оборудования и инфраструктуры;
- ликвидационные и природоохранные затраты, включая компенсационные выплаты и переселение жителей;
- затраты на консервацию обогатительных фабрик [24].

Проведенные после аварии исследования позволили установить ее причины: *наличие ослабленной (трещиноватой) зоны, которая явилась причиной нарушения сплошности ВЗТ при ведении очистных работ, и несоответствие параметров отработки горно-геологическим условиям.*

В 2006 году началось аварийное затопление Первого Березниковского рудника (БКПРУ-1), которое быстро стало неуправляемым и привело к потере рудника, части промплощадки, нарушению функционирования федеральной железной дороги, а в последующие годы – к разрушению большого количества гражданских и промышленных зданий и сооружений на территории г. Березники. По результатам проведенных научных работ причиной аварии названо аномальное строение соляной и надсоляной толщ, которое, в условиях отсутствия зоны смягчения обусловило возникновение критических напряжений в ВЗТ, нарушение ее сплошности и прорыв надсолевых вод в выработанное пространство рудника [24].

То есть, исходной причиной этих катастрофических потерь наукой фактически признается недостаточная изученность состава, характеристик и условий залегания пород в ВЗТ, что является ключевым условием устойчивости природно-технической системы «инженерно-геологический массив – подземное сооружение». Рассмотренные аварии произошли при полном соблюдении недропользователем требований к выполнению геологоразведочных работ, что может говорить только об одном – нормативные методики выполнения этих работ не позволяют построить геологическую модель, адекватную реальной геологической ситуации и гарантировать геомеханикам надежное параметрическое обеспечение.

Для стоимостной оценки предотвращаемого ущерба в мировой практике, в частности, применяется сравнение с затратами на строительство нового рудника аналогичной производительности. По данным [103], на 2023 год для запуска производства калийных удобрений соотношение капитальных и прочих затрат находится в пределах от 1 до 1,4 миллиарда долларов на один миллион хлористого концентрата. При этом в стоимость рудника не входит сооружение хвостохранилища, строительства автомобильных дорог, создания системы электроснабжения, и некоторые другие объекты. По этим же данным [103], соотношение стоимости горного комплекса (рудника) и обогатительной фабрики составляет примерно 60%:40%. Таким образом потеря рудника производительностью 2 млн. тонн калийных удобрений в год привела бы к ущербу в 2023 году минимум в 1.2 млрд. долларов:

$$\text{Ущерб}_{\text{общий}} = \text{Ущерб}_{\text{рудник}} = 1 \text{ млрд. \$} * 2 * 0,6 = 1,2 \text{ млрд. \$},$$

а в случае, если потеря рудника приводит к потере и обогатительной фабрики соответствующей производительности, ущерб вырастает до 2 млрд. долларов:

$$\begin{aligned} \text{Ущерб}_{\text{общий}} &= \text{Ущерб}_{\text{рудник}} + \text{Ущерб}_{\text{фабрика}} = \\ &1,2 \text{ млрд \$} + 1 \text{ млрд. \$} * 2 * 0,4 = 2 \text{ млрд. \$}. \end{aligned}$$

На 2023 год минимальный курс доллара по данным ЦБ РФ составлял примерно 70 рублей за один доллар (январь 2023 года), то есть по самой оптимистичной оценке, потеря в 2023 году рудника производительностью 2 млн. тонн калийных удобрений в год привела бы к ущербу $1,2 \text{ млрд. \$} * 70 \text{ Р/\$} = 84 \text{ млрд. рублей}$, а при сопутствующей потере и горно-обогатительной фабрики ущерб составил бы $2 \text{ млрд. \$} * 70 \text{ Р/\$} = 140 \text{ млрд. рублей}$. В случае пессимистичной оценки, при размере капитальных и прочих затрат в 1,4 млрд. долларов на один миллион хлористого концентрата в год и курсе доллара 97 рублей за один доллар (средний курс ЦБ РФ за октябрь 2023 года), ущерб достиг бы величины $2,8 \text{ млрд. \$} * 97 \text{ Р/\$} = 271,6 \text{ млрд. рублей}$.

Основной же потенциальный экономический эффект от внедрения результатов исследований ожидается за счет сохранения запасов полезных ископаемых, которые утрачиваются в случае аварийного затопления рудника. Оценить данный эффект возможно путем умножения оценки утрачиваемых при аварии запасов полезных ископаемых на стоимость готового продукта с учетом среднестатистического коэффициента извлечения. Коэффициент извлечения на Верхнекамском месторождении в 2020 году составил $14/52 = 0,27$, где в знаменателе – масса добытых калийных солей на ВКМС за 2020 год, а в числителе – масса произведенных из них калийных удобрений, в миллионах тонн [24]. Цена на калийные удобрения на мировом рынке в том же 2020 году составляла в среднем порядка 250 долларов [182]. Таким образом для случая с описанной выше аварией на БКПРУ-3, ущерб от утраты 300 млн. т. извлекаемых запасов калийных руд составил бы в 2020 году:

$$\text{Ущерб}_{\text{утр.запасов}} = 300\,000\,000 \text{ т} * 0,27 * 250 \frac{\text{\$}}{\text{т}} = 20\,250\,000\,000 \approx 20 \text{ млрд. \$}.$$

При переводе в рубли по курсу доллара на январь 2023 года сумма ущерба составила бы $20 \text{ млрд. \$} * 70 \text{ Р/\$} = 1,4 \text{ трлн. рублей}$. Таким образом, потенциальный экономический эффект от сохранения запасов на крупном руднике, аналогичном БКПРУ-3, примерно на порядок превышает потенциальный экономический эффект от сохранения самого рудника и горно-обогажительной фабрики.

Разработанный в диссертации комплекс методов (в первую очередь – шахтная сейсморазведка ПВРО, районирование территории по риску опасных процессов и мониторинг гидроизолирующих целиков) позволяет:

- выявлять эрозионные врезы, зоны замещения и инверсионный рельеф на ранних стадиях проектирования и эксплуатационных геологоразведочных работ;
- обоснованно корректировать проект горных работ, исключая отработку аномальных участков;
- вести непрерывный контроль состояния гидроизолирующих целиков и водозащитной толщи, своевременно фиксируя приближение параметров к критическим значениям.

При должной организации геологоразведочных работ благодаря этим возможностям вероятность возникновения аварий, подобных произошедшим на ВКМС, снижается до минимально возможного уровня. Экономический эффект от внедрения разработок только по предотвращению одного нового затопления составляет *более одного триллиона рублей*.

2. Снижение затрат на геофизические исследования\увеличение объемов исследований.

Метод шахтной сейсморазведки ПВРО, разработанный в диссертации, отличается от применяемых ранее стандартных методик более высокой производительностью при меньшей численности полевой бригады. Согласно выполненному автором анализу, месячная производительность одной бригады при выполнении работ стандартным методом составляет не более 5 пог. км, а методом ПВРО – порядка 11 пог. км. Такое увеличение производительности достигается благодаря:

- сокращению числа вспомогательных операций за счёт использования горизонтально-ориентированных приёмников и источника;

- повышению скорости полевых работ за счёт сокращения количества возбуждений на точке с 16 до 5;

- снижению количества ошибок, допускаемым оператором сейсмостанции за счет использования специально разработанных программ EJ и FastMineProc.

Таким образом, возможно либо сокращение численности специалистов–геофизиков, занятых на полевых сейсморазведочных работах, что приведет к значительной экономии, либо расширение объемов геологоразведочных работ, что приведет к росту объемов ценной информации об инженерно-геологических условиях осваиваемых участков шахтных полей.

Интегральный экономический эффект.

Суммарный ожидаемый экономический эффект от применения результатов диссертационной работы складывается из двух частей:

- текущий эффект – экономия эксплуатационных затрат на геофизические исследования либо увеличение объемов сейсморазведочных работ в 2.6 раза без увеличения затрат;

- страховой эффект – предотвращение катастрофических потерь при ликвидации аварий и потере запасов.

Учитывая, что стоимость реализации предложенных методик (обучение персонала, оснащение бригад оборудованием) не превышает нескольких сотен тысяч рублей, окупаемость внедрения составляет менее одного года только за счёт снижения текущих затрат на сейсморазведку либо повышения объемов сейсморазведочных работ в 2.6 раза. При этом потенциально предотвращаемый ущерб от аварий многократно превосходит все затраты на внедрение.

Таким образом, применение разработанных научно-методических основ является экономически целесообразным и может быть рекомендовано для всех организаций, ведущих подземную разработку соляных месторождений, проектирование и строительство подземных сооружений, а также научную и образовательную деятельность. Предлагаемые разработки уже успешно внедрены и функционируют в ряде таких компаний, где показали свою эффективность (приложение 1). С учетом перспективности и положительного опыта внедрения предлагаемых разработок, автором сформулированы следующие рекомендации по их дальнейшему использованию.

1. Внедрить метод шахтной сейсморазведки на поперечных волнах с разделением отражений (ПВРО) в практику инженерно-геологических изысканий и мониторинга:

- организациям, ведущим подземную разработку соляных месторождений, рекомендуется применять метод ПВРО для детального изучения геологического строения водозащитной толщи (ВЗТ) и гидроизолирующих целиков;
- метод следует использовать на этапах геологоразведки (для уточнения структуры соляных поднятий, выявления эрозионных врезов и зон замещения), проектирования (для обоснования размещения горных выработок) и эксплуатации (для мониторинга состояния ВЗТ и целиков).

2. Обеспечить системный мониторинг состояния водозащитной толщи:

- на участках с повышенным риском наличия опасных геологических процессов ($P > 0,5$ по разработанной методике районирования) проводить регулярные сейсморазведочные исследования методом ПВРО в вертикальной плоскости;
- по результатам мониторинга оценивать мощность ВЗТ, выявлять признаки инверсионного рельефа, эрозионных врезов и зон замещения, а также контролировать изменение сейсмических атрибутов (выход за пределы 2σ) как ранний индикатор деградации гидроизолирующих свойств.

3. Внедрить методику мониторинга гидроизолирующих целиков:

- для целиков, разделяющих действующие и ликвидируемые участки шахтных полей организовать периодический сейсмический мониторинг методом ПВРО в горизонтальной плоскости с регистрацией продольных и поперечных волн;
- в ходе мониторинга определять фактические геометрические параметры целиков (ширину), упругие константы (коэффициент Пуассона, модули упругости и сдвига), а также расчётные значения предела прочности на сжатие и степени нагружения.
- на основе этих данных выполнять прогноз изменения параметров целиков во времени и своевременно корректировать проектную документацию (при приближении параметров к критическим значениям).

4. Использовать разработанную методику районирования территории по

рisku опасных процессов:

- при планировании геологоразведочных работ и проектировании новых горизонтов или участков горных работ применять формализованную методику оценки риска наличия эрозионных врезов и инверсионного рельефа (по данным бурения и сейсморазведки);
- участки с высоким риском ($P > 0,75$) относить к зонам, требующим обязательного проведения детализационных геофизических работ до начала строительства подземных сооружений.

5. Применять разработанное программное обеспечение для обработки и интерпретации данных:

- рекомендовать геофизическим и геологическим службам рудников использование комплекса программ (12 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ) для обработки шахтных сейсмических данных, атрибутивного анализа, численного моделирования и решения прямой и обратной задач сейсморазведки в условиях полного пространства.

6. Дополнить нормативно-техническую документацию:

- внести изменения в «Указания по защите рудников от затопления», введенные на рудниках в соответствии с требованиями отраслевого норматива «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твёрдых полезных ископаемых» (пункт 192 и соответствующие разделы), дополнив их требованиями:

- об обязательном применении метода ПВРО для детального изучения геологического строения ВЗТ и гидроизолирующих целиков при подготовке проектной документации на разработку соляных месторождений;
- о регламенте проведения периодического сейсмического мониторинга целиков и ВЗТ с использованием метода ПВРО;
- о критериях отнесения участков к зонам с недопустимым риском (на основе показателя P и выхода сейсмических атрибутов за пределы 2σ);
- о порядке учета полученных сведений и рекомендаций как на этапах проектирования, так и на этапах строительства и эксплуатации

подземных сооружений.

7. Обеспечить повышение квалификации специалистов:

- организовать курсы повышения квалификации для геологов, геофизиков и маркшейдеров соляных рудников по применению метода ПВРО и интерпретации его результатов;
- включить в программы профильных вузов (направления «Инженерная геология», «Геофизика», «Горное дело») учебные модули, посвящённые шахтной сейсморазведке и мониторингу природно-технических систем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты исследований сводятся к следующим положениям.

1. Доказано, что геологическая среда соляных месторождений является динамичной геомеханической системой, для снижения риска активизации опасных инженерно-геологических процессов в которой необходимо обосновать инженерно-геологические модели месторождений и создать систему эффективной оценки и мониторинга строения и состояния массивов горных пород.

2. Разработано программно-алгоритмическое обеспечения для численного моделирования и обработки волновых полей. Установлены теоретически и доказаны на практике базовые принципы формирования, распространения и регистрации сейсмических волн в условиях полного пространства, что, в совокупности с установленными характеристиками шахтных регистрирующих установок позволило сформировать подход к выявлению закономерностей распределения физических свойств среды, в том числе связанных с опасными геологическими процессами.

3. Разработана методика полевых высокоточных шахтных сейсмических исследований, которая, с использованием созданного программно-алгоритмического комплекса, обеспечивает гарантированное формирование и фиксацию сейсмического отклика от целевых элементов инженерно-геологического массива.

4. Разработан высокоразрешающий метод шахтной сейсморазведки, включающего в себя методики возбуждения и регистрации высокочастотного сигнала, и цифровой обработки с выходом на формирование детальных инженерно-геологических моделей среды. Метод реализован в виде соответствующего программного обеспечения, внедрен в производственный процесс ряда организаций и прошел научно-практическое обоснование, на него получен патент на изобретение РФ (приложение 1).

5. Получен ряд новых сведений об инженерно-геологических условиях водозащитной толщи, в том числе впервые установлено наличие на ВКМС каньонообразных эрозионных врезов, представляющих угрозу безопасности подземным сооружениям. Выполнено геолого-геомеханическое обоснование

природы эрозионных врезов, создана динамическая модель их возникновения.

6. Выполнен комплексный анализ условий, в которых зафиксированы эрозионные врезы, обнаружены закономерности, сопутствующие их возникновению, предложен подход к формализованному вычислению показателя наличия инверсионного рельефа и эрозионных врезов, учитывающего литологический, структурный и морфологический факторы.

7. Созданы и обоснованы инженерно-геологические модели природно-технических систем соляных месторождений. Модели разработаны с учетом геологического строения, тектонической структуры, геоморфологических и горнотехнических условий. Доказано, что повышение объективности и информативности инженерно-геологических моделей возможно на основе выделения структурных элементов горного массива по различиям в упругих свойствах горных пород.

8. Произведено районирование ВКМС по признаку наличия опасных геологических процессов, сформирована классификация состояния ПТС «инженерно-геологический массив – подземное сооружение» на основе геологических и горнотехнических параметров. Установлена связь наличия эрозионных врезов, инверсии соляных поднятий и зон замещения с распределением ряда амплитудных, частотных и корреляционных характеристик сейсмических разрезов, выполнена классификация состояния ПТС с учетом поведения сейсмических атрибутов. Разработана методика выявления изменений в структурных характеристиках геологического разреза и распределении литологических свойств в вертикальной плоскости для анализа инженерно-геологического состояния и прогноза гидрогеологических свойств водозащитной толщи.

9. Разработан научный подход к переходу от упругих характеристик к геометрическим и инженерно-геологическим характеристикам горных пород между подземными сооружениями, который позволил создать методику детального сейсмического анализа, мониторинга и прогноза состояния гидроизолирующих целиков, представленных геотехническими массивами с заданными прочностными, деформационными и гидроизолирующими характеристиками.

10. Результаты исследований реализованы в виде методик, программного обеспечения, системы практических рекомендаций, обеспечивающих выполнение оценки и прогноза устойчивости природно-технических систем при подземной разработке соляных месторождений. Разработанные научно-методические основы оценки и прогноза устойчивости природно-технических систем апробированы и внедрены на рудниках ВКМС, где показали высокую эффективность при решении геологических и горнотехнических задач, и рекомендуются для практического использования при проектировании, строительстве и эксплуатации сооружений при подземной разработке соляных месторождений. Сформулированы предложения по внесению в действующие на рудниках указания по защите рудников от затопления, разработанные в соответствии с пунктом 192 «Правил безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» от 2021 года, требований о необходимости применения методик, представленных в данной работе при ведении геологоразведочных, проектных, горных и строительных работ.

Таким образом, в ходе исследований решена актуальная научная проблема оценки устойчивости природно-технических систем при подземной разработке соляных месторождений, имеющая важное социально-экономическое и хозяйственное значение. Предложены новые научно-обоснованные технические и методические решения, повышающие безопасность ведения подземных горных работ в условиях соляных месторождений и сохранность запасов ископаемых солей, что вносит значительный вклад в экономическое развитие Российской Федерации.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АБ – пласт АБ

АК – акустический каротаж

ВЗТ – водозащитная толща

ВКМС – Верхнекамское месторождение солей

ВСД – внутрисоляные деформации

ВСП – вертикальное сейсмическое профилирование

ГГШ – глинисто-гипсовая шляпа

ГДЯ – газодинамические явления

ГЦ – гидроизолирующий целик

ИГМ – инженерно-геологический массив

ИГУ – инженерно-геологические условия

ИГЭ – инженерно-геологический элемент

кКП – кровля карналлитовой пачки

кНПП – кровля нижней переходной пачки

КП – карналлитовая пачка

кПКС – кровля пласта покровной каменной соли

МГ – пласт маркирующей глины

МОВ МОГТ – метод отраженных волн по методике общей глубинной точки

НДС – напряженно-деформированное состояние

ОГТ – общая глубинная точка

ОС – обратная связь

ПВ – пункт возбуждения

ПВРО – способ шахтной сейсморазведки на поперечных волнах с разделением отражений

ПдКС – подстилающая каменная соль

ПКС – покровная каменная соль

ППр – пункт приема

ПС – подземное сооружение

ПТС – природно-техническая система

ПЦТ – пестроцветная толща

РП – ритмопачка

РЭ – расчетный элемент

СЗ – соляное зеркало

СМТ – соляно-мергельная толща

СП – сильвинитовая пачка

ССА – суммарный сейсмический атрибут

ТКТ – терригенно-карбонатная толща

ФВК – функция взаимной корреляции

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абатурова, И. В. Инженерно-геологические условия месторождений Урала в скальных массивах / Абатурова И. В., Грязнов О. Н. // Известия вузов. Горный журнал. – 2014. – № 6. – С. 160–168.
2. Абатурова, И. В. Модель природно-технической системы месторождений полезных ископаемых / И. В. Абатурова, В. Б. Писецкий // Разведка и охрана недр. – 2013. – № 1. – С. 41–46.
3. Абатурова, И. В. Научно-методические основы изучения, оценки и прогноза инженерно-геологических условий месторождений полезных ископаемых в скальных массивах : специальность 25.00.08 «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение» : диссертация на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук / Ирина Валерьевна Абатурова ; Уральский государственный горный университет. – Екатеринбург, 2012. – 389 с.
4. Абатурова, И. В. Оценка и прогноз инженерно-геологических условий на разных стадиях разведки месторождений полезных ископаемых / И. В. Абатурова, И. А. Савинцев, В. Б. Писецкий, И. Г. Петрова // Литосфера. – 2013. – № 3. С. 137–145.
5. Абатурова, И. В. Этапность изучения инженерно-геологических условий месторождений полезных ископаемых от разведки до отработки / И. В. Абатурова, И. А. Савинцев, Л. А. Стороженко, Э. Д. Нугманова, В. С. Козлов // Известия вузов. Горный журнал. – 2020. – № 7. – С. 83–91. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-7-83-91.
6. Абрамов С. П. Инженерные изыскания в строительстве. Справочник по общестроительным работам / С. П. Абрамов, Л. И. Беляевский, А. С. Спиридонов. – Москва : Стройиздат, 1975. – 480 с.
7. Алексеев, Е. Р. Free Pascal и Lazarus: Учебник по программированию / Е. Р. Алексеев, О. В. Чеснокова, Т. В. Кучер. – Москва : ALT LINUX. – 438 с.
8. Ампилов, Ю.П. От сейсмической интерпретации к моделированию и оценке месторождений нефти и газа / Ю.П. Ампилов. – Москва : СПЕКТР, 2008. – 384 с.

9. Андрейко С. С. Механизм образования очагов газодинамических явлений в соляном породном массиве / С. С. Андрейко. – Пермь : Издательство Пермского государственного университета, 2008. – 196 с.
10. Аникеев, А. В. Некоторые вопросы оценки карстового риска / А. В. Аникеев // Проблемы снижения природных опасностей и рисков: материалы Междунар. науч.-практ. конф. «Геориск-2009», – 2009. – Т.2. – С. 4–9.
11. Аникеев, А. В. Опасность и риск образования воронок провала и оседания в карстовых районах: основные показатели, подходы и способы оценки / А. В. Аникеев // Инженерная геология. – 2016. – № 5. – С. 10–18.
12. Аникеев, А. В. Определение напряженного состояния грунтовой толщи над карстовой полостью / А. В. Аникеев, Э. В. Калинин, С. И. Тараканов // Инженерная геология. – 1991. – № 5. – С. 64–70.
13. Аникеев, А. В. Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска / А. В. Аникеев. – Москва: РУДН, 2017. – 328 с.
14. Аптуков, В. Н. Численное моделирование процессов ударного и взрывного деформирования элементов конструкций и грунтов / В. Н. Аптуков, А. В. Фонарев. – Пермь : Издательство Пермского государственного университета, 2009. – 220 с.
15. Асанов В. А. Геомеханическая оценка устойчивости несущих элементов камерной системы разработки соляных пород : специальность 25.00.20 «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Владимир Андреевич Асанов ; Горный институт Уральского отделения РАН. – Пермь, 2004. – 392 с.
16. Асанов, В. А. Экспериментальные и теоретические исследования длительной устойчивости несущих элементов камерной системы разработки калийных пластов / В. А. Асанов, И. Л. Паньков, А. В. Евсеев и др // Вестник пермского научного центра. – 2017. – № 1. – С. 8–14.
17. Бабкин, А. И. Шахтная сейсмоакустика по методике многократных перекрытий (на примере Верхнекамского месторождения калийных солей) : специальность 25.00.16 «Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология,

геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Андрей Иванович Бабкин ; Горный институт УрО РАН. – Пермь, 2001. – 157 с.

18. Бакиров, Ж. Б. Определение ширины целиков при камерной отработке рудного месторождения / Бакиров Ж. Б., А. А. Такишов, М. Ж. Бакиров, В. Ф. Михайлов // Труды университета. — 2021. — № 4 (85). — С. 119—125. DOI: 10.52209/1609_1825_2021_4_119. -12

19. Барях А. А. К определению горизонтальных деформаций подработанных территорий / А. А. Барях, Л. О. Тенисон, Н. А. Самоделкина // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 11. – С. 5–18. -8

20. Барях, А. А. К расчету устойчивости целиков при камерной системе разработки / А. А. Барях, Н. А. Самоделкина // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2007. – № 1. – С. 11–20. -14

21. Барях, А. А. Анализ изменения степени нагружения междукammerных целиков во времени на Верхнекамском месторождении солей / А. А. Барях, С. Ю. Лобанов, И. С. Ломакин // Физикотехнические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2015. – № 4. – С. 70–82. -5

22. Барях, А. А. Ликвидация калийных рудников и соляных шахт: обзор и анализ проблемы / А. А. Барях, А. В. Евсеев // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2019. - № 9. - С. 5-29. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-09-0-5-29.

23. Барях, А.А. Массовое динамическое обрушение пород на руднике Верхнекамского калийного месторождения / А.А. Барях, В.А. Асанов, И.Л. Паньков // Триггерные эффекты в геосистемах. Материалы третьего Всероссийского семинара-совещания, г. Москва, 16–19 июня 2015 г. – С. 199–206.

24. Барях, А.А. Калийная промышленность России: проблемы рационального и безопасного недропользования / А.А. Барях, Э.В. Смирнов, С.Ю. Квиткин, Л.О. Тенисон // Горная промышленность. – 2022. – №1. – С. 41-50.

25. Бат, М. Спектральный анализ в геофизике / Маркус Бат. – Москва : Недра, 1980. – 530 с.

26. Батракова, Г. М. Оценка природных и техногенных рисков для территорий нового строительства / Г. М. Батракова, О. В. Савинова // Актуальные

проблемы природопользования и природообустройства. Сборник статей II Международной научно-практической конференции. – 2019. – с. 55-58.

27. Батурин, Е. Н. Проблемы освоения крупнейших калийных месторождений мира [Электронный ресурс] / Е. Н. Батурин, Е. А. Меньшикова, С. М. Блинов, Д. Ю. Наумов, П. А. Белкин // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 6. – Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_23220948_93498513.pdf.

28. Баяндина, Э. О. Нерастворимый остаток солей Верхнекамского месторождения / Э. О. Баяндина, А. И. Кудряшов. – Пермь : Издательство ООО «Типограф», 2015. – 102 с.

29. Беликов А. А. Обоснование геомеханической модели соляных пород для прогноза напряженно-деформированного состояния водозащитной толщи при разработке месторождения каменных солей : специальность 2.8.6 «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэродинамика и горная теплофизика» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Артем Артурович Беликов ; Санкт–Петербургский горный университет. – Санкт–Петербург, 2024. – 131 с.

30. Белкин, П. А. Закономерности техногенной трансформации химического состава подземных вод в районах разработки калийных месторождений // П. А. Белкин, В. Н. Катаев //Известия Уральского государственного горного университета. 2018. № 2 (50). С. 55-64.

31. Беляков, Н. А. Прогноз целостности водозащитной толщи на Верхнекамском месторождении калийных руд / Н. А. Беляков, А. А. Беликов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6-2. – С. 33–46. -7

32. Бенявски З. Управление горным давлением / З. Бенявски. – Москва : Мир, 1990. – 254 с. -9

33. Берзон, И. С. Сейсмические обменные отраженные волны / И. С. Берзон. – Москва : Рипол Классик, 2013. – 232 с.

34. Боганик, Г. Н. Сейсморазведка. Учебник для ВУЗов / Г. Н. Боганик, И. И. Гурвич. – Тверь : АИС, 2006. – 744 с.

35. Болтыров, В. Б. Опасные техно-природные процессы на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей (Пермский край) /

Болтыров В. Б., Ватагина В. Е. // Защита населения и территорий в чрезвычайных ситуациях. Труды II Международной научно-практической конференции. – 2016. – С. 67–72.

36. Большаков, Д. К. Методика и технология получения трехмерных данных методом электротомографии / Д. К. Большаков, К. Д. Ефремов, И. Н. Модин // Гоевразия-2022. Геологоразведочные технологии: наука и бизнес. Труды V Международной геолого-геофизической конференции. Тверь. – 2022. С. 144–147.

37. Бондарев В. М. Сейсмический метод определения физико-механических свойств нескальных грунтов / В. М. Бондарев. – Екатеринбург: издательство УГГГА, 1997. – 220 с.

38. Бондарев, В.И. Основы обработки и интерпретации данных сейсморазведки / В.И. Бондарев, С.М. Крылатков. – Екатеринбург: УГГГА, 2001. – 193 с.

39. Бондарик, Г. К. Инженерно-геологические изыскания / Г. К. Бондарик, Л. А. Ярг. – Москва : издательство КДУ, 2018. – 457 с.

40. Бондарик, Г. К. Экологическая проблема и природно-технические системы / Г. К. Бондарик. – М.: Икар, 2004. – 152 с.

41. Бондарик, Г. К. Общая теория инженерной (физической) геологии / Г. К. Бондарик. – Москва : Недра, 1981. – 322 с.

42. Бондарик, Г. К. Основы теории изменчивости инженерно-геологических свойств горных пород / Г. К. Бондарик. – Москва : Недра, 1971. – 272 с.

43. Бондарик, Г. К. Теория геологического поля / Г. К. Бондарик. – Москва : РИЦ ВИМС, 2002. – 298 с.

44. Бондарик, Г. К. Экологическая проблема и природно-технические системы / Г. К. Бондарик. – Москва : Икар, 2004. – 308 с.

45. Бондарик, Г.К. Диагностика и прогнозирование состояния неоднородных природных и природно-технических систем / Г.К. Бондарик // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2010. – № 1. – С. 78–79.

46. Бондарик, Г.К. Инженерно-геологические изыскания: учебное пособие, электронное издание сетевого распространения / Г.К. Бондарик, Л.А. Ярг.

– Москва: «КДУ», 2018. – 357 с. – Режим доступа: <https://bookonlime.ru/node/563/>

47. Борейко, Л. Г. Выделение в разрезе инженерно-геологических элементов на основе анализа изменчивости инженерно-геологических свойств исследуемых пород с помощью ЭВМ / Л. Г. Борейко // Инженерная геология. – 1982. – № 3. – С. 82–91.

48. Борзаковский, Б.А. Процессы выщелачивания солей при затоплении рудника БКПРУ–1 / Б.А. Борзаковский, А.В. Шилов // Горный информационный аналитический бюллетень. – 2010. – № 9. С. 136–143.

49. Буреева, Н.Н. Многомерный статистический анализ с использованием ППП «STATISTICA»: учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Применение программных средств в научных исследованиях и преподавании математики и механики» / Н.Н. Буреева. – Нижний Новгород, 2007. – 112 с.

50. Бычков, С. Г. Гравиметрические исследования Верхнекамского месторождения калийных солей / С. Г. Бычков, Г. В. Простолупов, Г. П. Щербинина // Геофизика. – 2014. – № 5. – С. 46-51.

51. Бычков, С. Г. Гравиметрический мониторинг территории разработки Верхнекамского месторождения калийных солей / С. Г. Бычков, Г. В. Простолупов, Г. П. Щербинина // Горный журнал. – 2013. – № 6. – С. 22-25.

52. Вагин, В. Б. Шахтные сейсмические методы изучения строения массивов соляных пород / В. Б. Вагин. – Минск: БелНИЦ "Экология", 2010. - 188 с.

53. Вагин, В.Б. Исследование и оценка состояния водозащитной толщи над калийными горизонтами геофизическими методами / В. Б. Вагин, А. М. Ефимов, Е.В. Кулагов // Горный журнал. – № 2. – 2014. – С. 11-15.

54. Великин, С. А. Комплексное геофизическое изучение инженерно-геокриологического состояния оснований гидро- и горнотехнических сооружений Якутской Алмазоносной провинции : специальность 25.00.08 «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Сергей Александрович Великин ; Институт мерзлотоведения Сибирского отделения РАН. – Якутск, 2020. – 316 с.

55. Вишняков, Я.Д. Общая теория рисков. 2-е изд / Я. Д. Вишняков, Н. Н. Радаев. – Москва.: Академия, 2008. – 368 с.
56. Владов, М. Л. Применение сейсмоакустических методов в системе мониторинга гидротехнических сооружений / М. Л. Владов, В. В. Капустин, В. С. Стручков, и др. // Геотехника. – 2017. – № 5. – С. 32-43.
57. Власов, С. В. Методика и технология 3D-3С сейсмических исследований геологического строения и мониторинга состояния устойчивости горного массива в процессе проходки транспортных тоннелей : специальность 25.00.10 – «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых» : диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук / Сергей Викторович Власов ; Уральский государственный горный университет. – Екатеринбург, 2012. – 132 с.
58. Вознесенский, Е. А. Использование данных сейсмоакустических исследований для оценки динамической устойчивости грунтов в массиве / Е. А. Вознесенский, М. Л. Владов, Е. С. Кушнарева, В. Г. Коваленко // Разведка и охрана недр. – 2005. – № 12. – С. 41-46.
59. Ворожев, А. В. Инженерно-геологическое обеспечение проектирования глубоких шахтных стволов (на примере месторождения Юбилейное) : специальность 25.00.08 «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение» : диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук / Андрей Владимирович Ворожев ; Уральский государственный горный университет. – Екатеринбург, 2013. – 136 с.
60. Газизов, М.С. Оценка устойчивости закарстованных пород в основании инженерных сооружений // Проектирование, строительство и эксплуатация земляного полотна. – М.: Транспорт, 1968. – Вып. 8. – С. 29-44.
61. Галкин, А. Н. Методологические основы инженерно-геологического обоснования управления природно-техническими системами / А. Н. Галкин // Инженерная геология. – 2012. – № 2. – С. 63–72.
62. Галкин, А. Н. О новом подходе к инженерно-геологической типизации природно-технических систем Белоруссии / А. Н. Галкин // Инженерная геология. – 2014. – № 3. – С.46–59.

63. Галкин, В. И. Исследование содержания галопелитов в пласте каменной соли Б-В Верхнекамского месторождения калийных солей / В. И. Галкин, С. С. Андрейко, Н. А. Литвиновская, С. В. Галкин, Т. А. Лялина // Геологоразведочные работы. – 2022. – № 4. – С. 103-108.

64. Галкин, В. И. Разработка многомерных статистических моделей для инженерно-геологического районирования территорий / В. И. Галкин, В. В. Середин, П. А. Красильников, А. В. Расегаев // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2017. – № 3. – С. 58 – 66.

65. Гамбурцев, А. Г. Концепция мониторинга природно-технических систем / А. Г. Гамбурцев // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 1994. – № 4. – С.12–19.

66. Глазунов, В. В. Обоснование оценки степени трещиноватости скального массива методом георадиолокации на основе математического моделирования / В. В. Глазунов, С. М. Данильев // Записки Горного института. – 2012. – Т. 199. – С. 199-205.

67. Глазунов, В. В. Применение метода георадиолокации для исследования состояния крепи и закрепного пространства рудника "Октябрьский" / В. В. Глазунов, С. М. Данильев // Записки Горного института. – 2011. – Т. 189. – С. 15-18.

68. Глебов С.В. Обоснование рациональных комплексов геофизических исследований водозащитной толщи на месторождениях водорастворимых руд : На примере Верхнекамского месторождения калийных солей : специальность 25.00.16 «Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Сергей Валерьевич Глебов ; Горный институт УрО РАН. – Пермь, 2006. – 157 с.

69. Глухих, А.В. Геологическое обоснование результатов шахтной сейсморазведки на поперечных волнах с разделением отражений ПВРО / А. В. Глухих, А. А. Жуков, Ю. Н. Морошкина, А. М. Пригара, Р. И. Царев // Материалы конференции «Инженерная и рудная геофизика 2020». – Пермь, 2020.

70. Голодковская, Г.А. О влиянии тектонических процессов на формирование инженерно-геологических свойств горных пород // Вопросы инженерной геологии и грунтоведения. – М.: Изд-во МГУ, 1968. – С. 17-34.

71. Голубев, Б. М. Строение соляной толщи Верхнекамского месторождения : специальность 120 «Геология» : диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук / Борис Михайлович Голубев ; Пермский государственный университет. – Пермь, 1972. – 219 с.

72. Горпинченко, В. А. Методика определения эффективных параметров разгрузочных скважин для безопасной разработки удароопасных месторождений Норильского промышленного района / В. А. Горпинченко, В. В. Сазнов, А. А. Андреев, В. Б. Вильчинский // Горный журнал. – 2015. – № 6. – С. 68–73. -2

73. ГОСТ 12248-2020. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. – Москва : Стандартинформ, 2020.

74. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. – Москва : Стандартинформ, 2020.

75. ГОСТ 30416-2020. Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения. – Москва : Стандартинформ, 2020.

76. ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. – Москва : Стандартинформ, 2016.

77. ГОСТ 57719–2017. Горное дело. Выработки горные. Термины и определения. – Москва : Стандартинформ, 2017.

78. Грунтоведение / Под ред. В.Т. Трофимова. 6-е изд. М.: МГУ, 2005. – 1024 с.

79. Губина А. И. Геофизические методы стратиграфической корреляции. Учебное пособи для студентов ВУЗов / А. И. Губина. – Издательство Пермского государственного технического университета. – Пермь, 2010. – 112 с.

80. Данильев, С. М. Локализация участков развития геомеханических процессов в подземных выработках по результатам трансформационно-классификационного анализа сейсморазведочных данных / С. М. Данильев, Д. Д. Секерина, Н. А. Данильева // Записки Горного института. – 2024. – Т. 266. – С. 260-271.

81. Данильев, С. М. Обоснование методики георадиолокационных исследований зон деструкции инженерно-геологических объектов : специальность 25.00.10 - Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых : диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук / Сергей Михайлович Данильев ; Санкт-Петербургский государственный горный университет. – Санкт-Петербург, 2011. – 133 с.

82. Дементьев А. В. Геомеханика : методические указания к практическим занятиям для обучающихся специальности 21.05.04 Горное дело, специализация Шахтное и подземное строительство, и специальности 21.05.05 Физические процессы горного или нефтегазового производства, специализация Физические процессы горного производства / А. В. Дементьев. – Кемерово : Кузбасский государственный технический университет, 2021. – 40 с. Текст : электронный

83. Денисов, М.И. Отчет по геологическому доизучению масштаба 1:200000 групповым методом листов Р-40_XXXIII/юж.пол./, Р-40-XXXIV/юго-зап.четв./О-40-IV/зап.пол./, О-40-IX/сев.пол./О-40-X/сев.-зап.четв./ в бассейнах рек Камы, Яйвы, Глухой Вильвы на Среднем Урале за 1977-1980 гг. Отчет в 3-х томах / Денисов М.И., Никитин А.Г., Мартемьянов В.В. – Пермь : Министерство геологии РСФСР, Уральское производственное геологическое объединение «Уралгеология», Пермская комплексная геологоразведочная экспедиция, 1980 г.

84. Джиноридзе, Н. М. Петротектонические основы безопасной эксплуатации Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей / Н. М. Джиноридзе. – Санкт-Петербург – Соликамск : ОГУП Соликамская типография, 2000. – 400 с.

85. Димухаметов, Д.М. Суффозионные процессы на территориях городов / Д.М. Димухаметов, Л.А. Новопоселенских, Н. С. Бахарева // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2-2.

86. Долгаль, А. С. Компьютерные технологии интерпретации гравитационного и магнитного полей в условиях горной местности : специальность 25.00.10 «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых» : диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук / Александр Сергеевич Долгаль ; Объединенный институт Физики земли. – Москва, 2002. - 351 с.

87. Егоров, А. С. Геофизические методы поисков и разведки месторождений / А. С. Егоров, В. В. Глазунов, А. П. Сысоев. – Санкт-Петербург : Горный университет, 2016. – 275 с.

88. Елкин В.А. Оценка карстовой опасности при инженерных изысканиях: обзор российских нормативных технических документов // Инженерные изыскания. – 2018. – № 11-12. – С. 12.

89. Елохина, С. Н. Гидрогеоэкологические последствия горного техногенеза на Урале / С. Н. Елохина. – Екатеринбург : ООО «УИПЦ», 2013. – 187 с.

90. Ермаков, А. П. Опыт применения многоволновой сейсморазведки при оценке карстовой опасности / А. П. Ермаков, М. Л. Владов, М. С. Суворова // Проблемы инженерного мерзлотоведения. Материалы IX международного симпозиума. – 2011. – С. 476-481.

91. Житинская О. М. Влияние компонентов инженерно-геологических условий на устойчивость бортов железорудных карьеров при длительной их разработке : специальность 25.00.08 «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение» : диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук / Ольга Михайловна Житинская ; Российский государственный геологоразведочный университет. – Санкт-Петербург, 2024. – 131 с.

92. Жуков, А. А. Влияние направленности источников и приемников на результаты шахтной сейсморазведки / А.А. Жуков, А.М. Пригара, Р.И. Царев, И.Ю. Шусткина, В.А. Ворошилов // Геофизика. – 2019. – №5. – С. 26–36.

93. Жуков, А. А. Возможности шахтной сейсморазведки на поперечных волнах / А.А. Жуков, А.М. Пригара, Р. И. Царев // Материалы международной научно-практической конференции EAGE «Инженерная и рудная геофизика 2019». – Геленджик, 2019.

94. Жуков, А. А. Комплексная диагностика состояния бетонной крепи шахтных стволов калийных рудников / А.А. Жуков, А.М. Пригара, В.В. Тарасов, Р.И. Царев // Горный журнал. – 2014. – №4. – С. 81–87.

95. Жуков, А. А. Обнаружение карстовых полостей комплексом геофизических методов в отвалах горнодобывающей промышленности / А. А. Жуков, А. М. Пригара, И. Ю. Пушкарева, Р. И. Царев, В. А. Ворошилов //

Материалы международной научно-практической конференции, приуроченной к 90-летию со дня основания института «Уралмеханобр», г. Екатеринбург. – 2019 г. – С. 90-94.

96. Жуков, А. А. Опыт применения комплекса геофизических методов для выявления карстовых полостей в отвалах калийных рудников / А.А. Жуков, А.М. Пригара, И.Ю. Пушкарёва, Р.И. Царев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – №5. – С. 120–130.

97. Жуков, А. А. Особенности применения сейсморазведки на поперечных волнах в условиях подземных выработок калийного рудника / А. А. Жуков, А. М. Пригара, И. Ю. Пушкарёва, Р. И. Царев, В. А. Ворошилов // Материалы международной научно-практической конференции, приуроченной к 90-летию со дня основания института «Уралмеханобр». 2019. – Екатеринбург. – С. 86-89.

98. Жуков, А.А. Оценка глубины проникновения электромагнитных волн в солях ВКМС / А.А. Жуков, А.М. Пригара, И.Ю. Пушкарёва, Р.И. Царев // Геофизика. – 2017. – №5. – С. 25–28.

99. Жуков, А.А. Оценка скорости распространения электромагнитных волн в солях Верхнекамского месторождения солей / А.А. Жуков, А.М. Пригара, И.Ю. Пушкарёва, Р.И. Царев // Инженерные изыскания. – 2017. – №3. – С. 28–33.

100. Жуков, А.А. Применение геофизических методов для выявления ослабленных зон в солеотвалах калийных рудников / А.А. Жуков, А.М. Пригара, Р.И. Царев, И.Ю. Шусткина // Материалы международной научно-практической конференции «Инженерная и рудная геофизика 2018». – 2018.

101. Жуков, А.А. Решение горнотехнических задач на месторождении калийных солей методами геофизики / А.А. Жуков, А.М. Пригара, Р.И. Царев, В.А. Ворошилов // ГИАБ. – 2022. – №5. – С. 82–91.

102. Жуков, А.А. Способ шахтной сейсморазведки для изучения особенностей геологического строения ВКМС / А. А. Жуков, А. М. Пригара, И. Ю. Пушкарёва, Р. И. Царев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019 г. – №4. – С. 121-136.

103. Земсков А.Н. Обоснование величины затрат при строительстве калийных предприятий в России и за рубежом / А.Н. Земсков, М.Ю. Лискова, М.Ю. Шамрин // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2023 г. – №4 – С. 699-708.

104. Зубов, В. П. Повышение безопасности рудников при отработке Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей / В. П. Зубов, Е. Р. Ковальский, С. В. Антонов, В. В. Пачгин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 5. – С. 22-33. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-22-33

105. Зубов, В. П. Снижение рисков затопления калийных рудников при прорывах в горные выработки подземных вод / В. П. Зубов, А. Д. Смычник // Записки Горного института. – 2015. – Т. 215. – С. 29-37.

106. Инженерная геология СССР. Русская платформа. Кн. 1. Москва : Недра, 1992. 528 с.

107. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Ч. I–III. Москва : ПНИИС Госстроя России, 1997–2000.

108. Инструкция по изучению инженерно-геологических условий месторождений полезных ископаемых при их разведке : издание официальное : утверждена и введена в действие приказом министра геологии СССР В. А. Ярмолюком 9 апреля 1973 г : введена впервые : дата введения 9 апреля 1973 г / разработана Г. Г. Скворцовым, Н. Г. Бобовым, А. К. Кориковской. – Москва : Министерство геологии СССР, 1973. Текст : непосредственный.

109. Исаев, С. В. Концепция природно-технических систем и ее использование при изучении антропогенной трансформации природной среды / С. В. Исаев // Географический вестник. – 2016. – № 3 (38). – С. 105–113.

110. Казикаев, Д. М. Практический курс геомеханики подземной и комбинированной разработки руд: Учебное пособие / Д. М. Казикаев, Г. В. Савич. – Москва : Издательство «Горная книга», 2013. – 224 с.

111. Калачев, В. Я. Инженерные сооружения : Учебное пособие / В. Я. Калачев, С. Н. Максимов. – Москва : Издательство МГУ, 1991. – 299 с.

112. Калинин, В. В. Возможность создания однонаправленных антенн малых волновых размеров для сейсморазведки. Часть 1. Приближение плоских волн / В. В. Калинин, М. Л. Владов // Технологии сейсморазведки. – 2009. – № 2. С. 33–37.

113. Калинин, В. В. Возможность создания однонаправленных антенн малых волновых размеров для сейсморазведки. Часть 2. Приближение сферических

волн / В. В. Калинин, М. Л. Владов // Технологии сейсморазведки. – 2009. – № 3. С. 15–19.

114. Калинин, В. В. Возможность создания однонаправленных антенн малых волновых размеров для сейсморазведки. Часть 3. Приближение сферических волн / В. В. Калинин, М. Л. Владов, А. А. Егоров // Технологии сейсморазведки. – 2014. – № 3. С. 79-84.

115. Калинин, Д. Ф. Возможности и ограничения информационно-статистических алгоритмов при обработке комплексов геоданных / Д. Ф. Калинин // В сборнике: Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей. 50-я юбилейная сессия Международного семинара им. Д.Г. Успенского - В.Н. Страхова. – Москва, 2024. – С. 181-185.

116. Караваева, Т. И. Природно-техногенные системы: экологические перспективы использования: монография / Т. И. Караваева, В. П. Тихонов. – Пермь: ПГНИУ, 2015. – 150 с.

117. Картозия, Б. А. Шахтное и подземное строительство : учебник для ВУЗов / Б. А. Картозия, Б. И. Федунец, М. Н. Шуплик, и др. – Москва : Издательство Академии горных наук, 2001. – 607 с.

118. Катаев, В. Н. Системный подход в анализе устойчивости карстовых массивов // Вестник Пермского университета. Геология. – 1994. – Вып. 3. – С. 127-144.

119. Кашников, Ю. А. Комплексные геомеханические проблемы при освоении недр / Ю. А. Кашников, С. Г. Ашихмин, Д. В. Шустов // Горный журнал. – 2025. – № 3. С. 11-18.

120. Кашников, Ю. А. Научные основы разработки методов прогноза параметров деформирования подрабатываемых скальных массивов мощных крутопадающих рудных месторождений : специальность 05.15.01 «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Юрий Александрович ; Московский государственный университет. - Москва, 1992. – 309 с.

121. Кашников, Ю. А. Численная модель для расчета напряженно-деформированного состояния горного массива и земной поверхности при добыче калийных руд / Ю. А. Кашников, С. Г. Ашихмин // Маркшейдерский вестник. – 2002. – № 3. С. 41-46.

122. Кирилов, А.С. Практикум по сейсмической интерпретации в PETREL / А.С. Кирилов, К.Е. Закревский. – Москва : Издательство МАИ-ПРИНТ, 2014. – 288 с.

123. Коваленко В. Г. Динамическая устойчивость массивов дисперсных грунтов и управление ею при функционировании нефтепромысловых сооружений (на примере месторождений Среднего Приобья) массивах : специальность 25.00.08 «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение» : диссертация на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук / Владимир Георгиевич Коваленко ; Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова. – Москва, 2008. – 340 с.

124. Кожеватов Е.Д. Некоторые теоретические вопросы проблемы понятия "глубинный карст" // Методика изучения карста: Тезисы докладов. Пермь, 1985. С. 18-19.

125. Колесников, В.П. Диагностика состояния земляных плотин методами неразрушающего контроля / В.П. Колесников, А.В. Татаркин, А.М. Пригара, А.В. Коноплев // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: материалы региональной научно-практической конференции. – 2009. – С. 257-261.

126. Колесников, В.П. Изучение флюидодинамики придонных отложений и дамб на основе метода естественного поля / В.П. Колесников, А.В. Татаркин, А.М. Пригара // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: материалы региональной научно-практической конференции. – 2010. – С. 195-198.

127. Колесников, В.П. Инженерно-геофизические исследования на подработанных территориях / В.П. Колесников, А.М. Пригара, А.В. Татаркин, А.А. Филимончиков // Инженерные изыскания. – 2012. – № 9. – С. 25-32.

128. Колесников, В.П. Метод подземного экспресс-зондирования для исследования околоштрекового пространства / В.П. Колесников, А.М. Пригара, А.В. Татаркин, А.А. Филимончиков, Е.И. Русских, А.А. Жуков // Геология и

полезные ископаемые Западного Урала: материалы региональной научно-практической конференции. – 2012. С. 110–113.

129. Колесников, В.П. Технология комплексных инженерно-геофизических изысканий для диагностики состояния гидротехнических сооружений / В.П. Колесников, А.В. Коноплев, А.М. Пригара, А.В. Татаркин // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – №6. – С. 630.

130. Колесников, В.П. Комплексные геофизические исследования состояния грунтов основания и фундаментов инженерных сооружений / В.П. Колесников, А.В. Татаркин, А.М. Пригара // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: материалы региональной научно-практической конференции. – 2011. – С. 89-91.

131. Коломенский Е.Н. О возможности использования теории вероятностей для решения некоторых задач инженерной геологии // Вестник Московского университета. Серия: Геология. 1968. № 2. С. 85-90.

132. Коломенский, Н. В. Общая методика инженерно-геологических исследований / Н. В. Коломенский. – Москва : Недра, 1968. – 342 с.

133. Комаров, И. С. Накопление и обработка информации в инженерно-геологических исследованиях / И. С. Комаров. – Москва : Недра, 1972. – 295 с.

134. Коммисаров, И. И. Основные функции моделирования в философии и науке / И. И. Коммисаров // Гуманитарный вестник. – 2020 г. – №2. – С. 1–13.

135. Кондратов, А. Б. Новая концепция и разработка технических решений по активной защите калийных рудников от затопления / А.Б. Кондратов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № 6. – С. 27–38.

136. Коноплев, А. В. Геоинформационное обеспечение проектирования разработки калийных месторождений / А. В. Коноплев, И. С. Копылов, П. А. Красильников, И. В. Кустов // Геоинформационное обеспечение пространственного развития Пермского края. Сборник научных трудов. – Пермь. – 2012. – С. 5 – 14.

137. Константинова, С. А. Некоторые задачи механики деформирования и разрушения соляных пород / С. А. Константинова, В. Н. – Новосибирск : Наука, 2013. – 191 с.

138. Королев, В. Ю. Теория вероятности и математическая статистика / В. Ю. Королев. – Москва : ТК Велби, Проспект, 2008. – 160 с.

139. Королев, В.А. Мониторинг геологических, природно-технических и эколого-геологических систем: учебное пособие / В. А. Королев; под ред. В.Т.Трофимова. – М.: КДУ, 2007. – 416 с.

140. Корягин, В.В. Математическое моделирование в сейсморазведке / В.В. Корягин, Ю.П. Сахаров. – Москва : Наука, 1988. – 160 с.

141. Костарев, В.П. О количественных показателях карста и их использовании при инженерно-геологической оценке закарстованных территорий / В. П. Костарев // Инженерно-строительные изыскания. М., 1979. № 31(53). С. 49-53.

142. Костицын, В. И. Методы повышения точности и геологической эффективности детальной гравиразведки : специальность 04.00.12 «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Владимир Ильич Костицын ; Государственная академия нефти и газа им. И. М. Губкина. - Москва, 1992. - 357 с.

143. Котельников, В. А. О пропускной способности эфира и проволоки в электросвязи – Всесоюзный энергетический комитет / В. А. Котельников // Материалы к I Всесоюзному съезду по вопросам технической реконструкции дела связи и развития слаботочной промышленности, 1933. Репринт статьи в журнале УФН. – 2006. – №176:7. С. 762–770.

144. Красильников, П. А. Использование геоинформационных систем для решения прогнозных инженерно-геологических задач при разработке месторождений полезных ископаемых / П. А. Красильников // Вестник Пермского университета. Геология. –2020. – Т. 19. – № 1. – С. 65–72.

145. Красильников, П. А. Метод инженерно-геологического районирования на основе вероятностно-статистического анализа и ГИС-систем / П. А. Красильников // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. – 2020. – № 3 (40). – С. 308-318.

146. Красильников, П. А. Проявление опасных геологических и техногенных процессов на урбанизированных закарстованных территориях Пермского края в 2023 году / П. А. Красильников, А. А. Татаркин, О. Д. Аброськин,

С. Г. Ашихмин, Г. М. Батракова // Вестник Пермского университета. Геология. – 2024. – Т. 23. № 1. – С. 32-39.

147. Красильников, П. А. Результаты мониторинга опасных инженерно-геологических процессов на территории пермского края в 2022 году / П. А. Красильников, О. Д. Аброськин, С. А. Красильникова, С. Г. Ашихмин, Г. М. Батракова, С. Н. Тагильцев // Успехи современного естествознания. – 2024. – № 3. – С. 120-125

148. Крашенинников, В. С. Локальная оценка карстовой опасности с учетом особенностей строения покрывающей толщи : специальность 25.00.08 "Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение" : дисс. на соискание уч. степени кандидата геол.-мин. наук / Крашенинников Вадим Сергеевич ; Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе. – Москва, 2017.

149. Крылаткова, Н.А. Атрибуты сейсмических волновых полей и их использование при решении задач инженерной геологии : специальность 25.00.08 «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение» : диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук / Надежда Анатольевна Крылаткова ; Уральский государственный горный университет. – Екатеринбург, 2008. – 102 с.

150. Кудряшов, А. И. Верхнекамское месторождение солей / А.И. Кудряшов. – Москва : Эпсилон Плюс, 2013. - 368 с.

151. Кулагов, Е. В. Особенности сейсмических волн, возбуждаемых в массиве соляных пород на Старобинском месторождении / Е. В. Кулагов // Літасфера. - 2012. - № 2 (37). - С. 105-111.

152. Куприяненко, Н. В. Статистика. Методы анализа распределений. Выборочное наблюдение. 3-е изд.: учебное пособие / Н. В. Куприяненко, О. А. Пономарева, Д. В. Тихонов. – Санкт–Петербург : Изд-во Политехнического университета. 2009. – 138 с.

153. Кутепов, В. М. Оценка карстовой и карстово-суффозионной опасности в проекте крупно-масштабного геологического картирования г. Москвы / В. М. Кутепов, И. В. Козлякова, Н. Г. Анисимова, и др. // Геоэкология. – 2011. – № 3. – С. 217–228.

154. Кухарев Н.М. Инженерно-геологические изыскания в областях развития карста в целях строительства / Н. М. Кухарев. – Москва : Стройиздат, 1975. – 168 с.

155. Лаптев, Б. В. Аварийные ситуации на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей / Б. В. Лаптев // Безопасность труда в промышленности. – 2009. – № 8. – С. 28-31.

156. Лаптев, Б. В. Историография аварий при разработке соляных месторождений / Б. В. Лаптев // Безопасность труда в промышленности. – 2011. – № 12. – С. 41–46.

157. Латыпов, А. И. Строение и инженерно-геологические особенности толщ элювиальных грунтов Восточного Закамья : специальность 1.6.7 «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение» : диссертация на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук / Айрат Исламгалиевич Латыпов ; Казанский (Приволжский) федеральный университет. – Казань, 2024, – 256 с.

158. Лебедева О. О. Прогноз деформационных процессов междушахтных целиков калийного месторождения на основе комплекса натурных исследований : специальность 2.8.6 ««Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Олеся Олеговна Лебедева ; Пермский национальный исследовательский политехнический университет. – Санкт–Петербург, 2024. – 131 с.

159. Ломтадзе В. Д. Инженерная геология. Инженерная петрология: учебник для вузов / В. Д. Ломтадзе. – Ленинград: Недра, 1970. – 527 с.

160. Ломтадзе, В. Д. Словарь по инженерной геологии / В. Д. Ломтадзе. – Санкт–Петербург : Издательство Санкт-Петербургского горного института, 1999. 360 с.

161. Ломтадзе, В. Д. Инженерная геология. Специальная инженерная геология / В. Д. Ломтадзе. – Москва : Недра, 1978. – 496 с.

162. Лурье, А. И. Теория упругости / А. И. Лурье. – Москва : Наука, 1970. – 940 с.

163. Лущик, А. В. Особенности мониторинга геологической среды в районах разработки соляных месторождений / А. В. Лущик, Н. И. Швырло, А. А. Лущик, Н. Ю. Денисова // Проблемы формирования и комплексного освоения месторождений солей. – Соликамск, 2000. – С. 149–150.

164. Маковецкий, О. А. Оценка перспектив развития подземного пространства мегаполисов / О. А. Маковецкий, Д. К. Серебренникова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Урбанистика. – 2013. – № 3 (11). – С. 78-90.

165. Маковецкий, О. А. Стратегия инновационного развития подземного городского пространства / О. А. Маковецкий // Вестник Приволжского территориального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. сборник научных трудов. Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – 2020. – С. 132-137.

166. Максимович, Н. Г. Формирование загрязнения поверхностных вод в районе разработки месторождения калийных солей / Н. Г. Максимович, Е. А. Хайрулина, В. Т. Хмурчик, А. Д. Макурова // В сборнике: Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Труды V Международной научно-практической конференции. – Пермь. – 2015. – С. 120-123.

167. Маловичко, А. А. Сейсмологический мониторинг на рудниках Верхнекамского месторождения калийных солей / А. А. Маловичко, Д. А. Маловичко, Р. А. Дягилев // Горный журнал. – 2008. – № 10. – С. 25–29.

168. Мансуров, К. Т. Основы программирования в среде Lazarus / К. Т. Мансуров. – Москва : Издательство Нобель Пресс, 2013. – 772 с.

169. Мартюшков, К. С. Прогноз прочности и устойчивости пород в подземных выработках с учетом изменчивости фрактальных характеристик и свойств массива : специальность 25.00.08 «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кирилл Сергеевич Мартюшков ; Уральский государственный горный университет. – Екатеринбург, 2013. – 136 с.

170. Маслов Н.Н. Основы инженерной геологии и механики грунтов: учебник для вузов / Н.Н. Маслов. – Москва: Высшая школа, 1982. – 511 с.

171. Меньшикова, Е.А. Формирование природно-технических систем горнопромышленных предприятий : специальность 25.00.08 «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение» : диссертация на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук / Елена Александровна Меньшикова ; Пермский государственный национальный исследовательский университет. – Пермь, 2022. – 375 с.

172. Методические рекомендации к «Указаниям по защите рудников от затопления и охране подрабатываемых объектов на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей». Введены в действие приказом ПАО «Уралкалий» № 525 от 21.03.2017. – 2014.

173. Методическое руководство по изучению инженерно-геологических условий рудных месторождений при их разведке / Под ред. В. И. Кузькина, Л. А. Ярг. – Москва : ВИМС, 2002. – 153 с.

174. Миннигузин, В.Э. Геофизические методы поисков карстовых полостей в солеотвалах / В. Э. Миннигузин, А. А. Жуков, А. М. Пригара, Р.И. Царев // Двадцать четвертая уральская молодежная научная школа по геофизике: Сборник научных материалов научной школы. – Пермь: Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН. – 2023. – С. 139-143.

175. Михайлов, А. Е. Структурная геология и геологическое картирование / А. Е. Михайлов. – Москва : Недра, 1984. - 464 с.

176. Михалевич, И.М. Применение математических методов при анализе геологической информации (с использованием компьютерных технологий): учебное пособие / И.М. Михалевич, С.П. Прими́на. – Иркутск: Иркут. гос. ун-т, 2006. – 115 с.

177. Модин, И. Н. Электротомография – инновационный геофизический метод для эффективного решения инженерно-геологических задач / И. Н. Модин, М. Н. Марченко О. И. Комаров, Н. П. Семейкин // Трубопроводный транспорт : теория и практика. – 2010. – № 1 (17). – С. 33–37.

178. Модин. И. Н. Электроразведка в технической и археологической геофизике : специальность 25.00.10 «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых» : диссертация на соискание ученой степени доктора

технических наук / Игорь Николаевич Модин ; Московский государственный университет. – Москва, 2010. – 321 с.

179. Назаров, Н. Н. Современный экзогенный морфогенез ландшафтов таежного Предуралья и Урала (западный склон) : специальность 11.00.01 «Физическая география, геофизика и геохимия ландшафтов» : диссертация на соискание ученой степени доктора географических наук / Николай Николаевич Назаров ; Санкт-Петербургский государственный университет. – Санкт-Петербург, 1996. – 433 с.

180. Некрасов А. С. Геолого-геофизическое моделирование карбонатных коллекторов нефтяных месторождений : специальность 25.00.10 «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Александр Сергеевич Некрасов ; Пермский государственный университет. – Пермь, 2006. – 420 с.

181. Новацкий, В. Теория упругости / В. Новацкий. – Москва : Мир, 1975. – 872с.

182. Обзор отрасли минеральных удобрений в 2019-2021 гг. // Департамент промышленно политики Евразийской экономической комиссии. – Москва, 2023. – с. 28. – Режим доступа: https://eec.eaeunion.org/upload/iblock/5cf/OBZOR_udobreniya_2019_2021_gg..pdf?yclid=mpzdalm88x188603448

183. Олянский, Ю. И. Основные закономерности изменения состава и свойств незасоленных и засоленных глинистых пород при диффузионном выщелачивании / Ю. И. Олянский, Е. В. Щекочихина, Д. А. Кузьменко, А. В. Татаркин, К. А. Алванян // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – Волгоград. – 2023. – № 3-4 (92). – С. 27-38.

184. Осинцев В. А. Расчет нагруженности ленточных междукамерных целиков / В. А. Осинцев, В. М. Беркович, А. Г. Горбунов, В. А. Любавина // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2013. – № 1. – С. 11–14. - 4

185. Осипов, В. И. Опасные экзогенные процессы / В. И. Осипов, В. М. Кутепов, В.П. Зверев и др. – Москва : ГЕОС, 1999. – 290 с.

186. Осипов, В. И. Системы охранного сейсмического мониторинга потенциально опасных объектов / В. И. Осипов, А. А. Гинзбург, А. В. Новикова // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2010. – № 5. – С. 458–461.

187. Осовецкий, Б. М. Проблемы организации литомониторинга на территории Прикамья / Б. М. Осовецкий // Охрана геологической среды с связи с народнохозяйственным освоением Прикамья. – Пермь, 1990. – С. 3–4.

188. Панюков, П. Н. Инженерная геология / П. Н. Панюков. – Москва : Недра, 1978. – 296 с.

189. Патент № 2280267 Российская Федерация, МПК G01V 1/00 (2006.01)/ Способ сейсмического обследования свайных фундаментов : № 2005117887/28 : заявл. 09.06.2005 : опубликовано 20.07.2006 / А.И. Бабкин, И.А. Санфиоров, А.Г. Ярославцев, А.М. Пригара, К.Б. Фаткин ; заявитель Горный институт УрО РАН. – 11 с.: ил.

190. Патент № 2624799 Российская Федерация, МПК G01V 1/00 / Способ комплексной диагностики состояния бетонной крепи и закрепного пространства шахтных стволов : № 2016119277 : заявл. 18.05.2016 : опубликовано 06.07.2017 / А.А. Жуков, А.М. Пригара, И. Ю. Пушкарева, В.В. Тарасов ; заявитель АО «ВНИИ Галургии». – 5 с.

191. Патент № 2709415 Российская Федерация, МПК G01V 1/00 (2006.01), G01V 1/28 (2006.01), G01V 1/30 (2006.01). Способ шахтной сейсмической разведки : № 2019109747 : заявл. 02.04.2019 : опубликовано 17.12.2019 / Пригара А. М., Жуков А. А., Царев Р. И., Шусткина И. Ю., Ворошилов В. А. ; заявитель АО «ВНИИ Галургии». – 10 с. : ил.

192. Патент № 2716760 Российская Федерация, МПК E21C 39/00 / Способ контроля целостности породных стенок при строительстве шахтных стволов : № 2016116197 заявл. 27.05.2019 : опубликовано 16.03.2019 / В. В. Тарасов, О.В. Иванов, В.С. Пестрикова, А.М. Пригара, И.В. Загвоздкин ; заявитель АО «ВНИИ Галургии». – 5 с.

193. Патрушев Ю. В. Дистанционная оценка и прогноз развития опасных инженерно-геологических процессов при строительстве тоннелей: специальность 25.00.08 «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение» : диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук / Юрий Владимирович Патрушев ; Уральский государственный горный университет. – Екатеринбург, 2017. – 130 с.

194. Пендин, Г.К. Инженерная геодинамика / Г. К. Пендин, В. В. Бондарик, Л. А. Ярг. – Москва – 2007. – 357 с.

195. Писецкий, В. Б. Атрибутный анализ в инженерной сейсморазведке / В. Б. Писецкий, Л. И. Зудилина // Инженерная сейсморазведка-2018. Сборник тезисов научно-практической конференции. –2018. – С. 130-134.

196. Писецкий, В. Б. Геомеханический анализ состояния массива горных пород на основе инженерно-геологических и геофизических данных с целью оптимизации схем подземной отработки рудных месторождений / В. Б Писецкий, И. А. Савинцев, В. А. Серков, С. М. Чевдарь, В. А. Шинкарьук // Проблемы недропользования. – 2016. – № 1(8). – С. 41–46.

197. Писецкий, В. Б. О выборе критерия оценки риска потери состояния устойчивости горного массива по сейсмическим, аэрогазовым и геомеханическим данным / / В. Б Писецкий, С. М. Чевдарь, С. Э. Лапин, и др. // В сборнике : Безопасность труда и эффективность производства горнодобывающих предприятий с подземным способом разработки. – 2016. – С. 59–65.

198. Писецкий, В. Б. Опережающий прогноз устойчивости горного массива на основе метода 3D-3С сейсмолокации в процессе проходки транспортных тоннелей / В. Б. Писецкий, С. В. Власов, А. Э. Зудилин, и др. // Горный журнал. – 2012. – № 3. – С. 130-138.

199. Писецкий, В. Б. Оценка структуры и параметров напряженного состояния горного массива при строительстве подземных сооружений / В. Б Писецкий, Э. С. Лапин, И. В. Абатурова, А. Э. Зудилин // Горный журнал. – 2014. – № 9. – С. 49–51.

200. Писецкий, В. Б. Прогноз и контроль развития опасных инженерно-геологических процессов в подземном строительстве / В. Б Писецкий, И. А. Савинцев, Ю. В. Патрушев, С. М. Чевдарь // Горный журнал. – 2015. – № 9. – С. 13-15.

201. Писецкий, В. Б. Прогноз устойчивости горного массива на основе метода сейсмической локации при строительстве подземных сооружений // В Б.

Писецкий, В. В. Власов, В. П. Черепанов, И. В. Абатурова, и др. // – Инженерные изыскания. – 2014. – № 9-10. – С. 46-51.

202. Полянский П.О. Динамическая обработка преломленных волн по материалам ОГТ в Горловском угольном бассейне / П.О. Полянский, А.Ф. Еманов, А.С. Сальников // Геофизические исследования. – 2025. – № 1. С. 39-66.

203. Потапов, Д. В. Оптимизация алгоритма поиска наиболее достоверных реализаций геологической модели / Потапов Д.В., Путилов И.С., Хижняк Г.П., Шумилов А.В. // Недропользование. – 2025. – Т. 25. № 1. – С. 1-8.

204. Пошихонов, В. Г. Современные методы и средства измерения параметров гравитационного поля Земли / В. Г. Пошихонов, О. А. Степанов, В. Н. Конешов. – Санкт-Петербург : Концерн «Центральный научно-исследовательский институт «Электроприбор». – 2017. – 390 с.

205. Правила по защите рудников от затопления в условиях Старобинского месторождения калийных солей. – Минск: ОАО «Белгорхимпром», 2006. – 97 с.

206. Пригара А.М. Особенности обработки данных шахтной сейсморазведки на поперечных волнах с разделением отражений / А.М. Пригара//Материалы конференции EAGE «Инженерная и рудная геофизика 2020». – Пермь, 2020.

207. Пригара А.М. Решение задач эксплуатационной разведки и повышение безопасности горных работ с помощью шахтной сейсморазведки способом ПВРО / А. М. Пригара, А. А. Жуков, Р. И. Царев, Ю. А. Кашников // Горный журнал. – 2021. – №4. – С. 23–27.

208. Пригара, А. М. Исследование процесса распространения волн при сейсмоакустических воздействиях в породном массиве методами математического моделирования / А. М. Пригара, В. Н. Аптуков, В. А. Ворошилов, А. А. Жуков, Р. И. Царев // Материалы конференции EAGE «Инженерная и рудная геофизика 2020». – Пермь, 2020.

209. Пригара, А. М. Особенности применения способа шахтной сейсморазведки на поперечных волнах с разделением отражений / А. М. Пригара // Известия СО секции наук о Земле РАЕН. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. – 2019. – Т. 42. – №2. – С. 176-184.

210. Пригара, А. М. Прогноз строения и свойств горного массива на основе сейсмо моделирования : специальность 25.00.16 «Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Андрей Михайлович Пригара ; Горный институт Уральского отделения Российской Академии наук. – Пермь, 2003. – 142 с.

211. Пригара, А. М. Эрозионные врезы в солях. Обнаружение шахтной сейсморазведкой и геомеханическое обоснование их природы / А.М. Пригара, Д.С. Грибков, В.Н. Аптуков, Р.И. Царев, А.А. Жуков // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 2. – С. 72–85.

212. Пригара, А.М. Влияние протяженных «волосяных» трещин на характеристики сейсмического волнового поля / А.М. Пригара, И.И. Семерикова // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: материалы региональной научно-практической конференции. – 2001. – С. 196-198.

213. Пригара, А.М. Возможности подавления поверхностных волн на основе подбора эффективных параметров группирования по данным сейсмо моделирования / А.И. Бабкин, А.М. Пригара // Горное эхо. – 2002. – №3. – С. 43-45.

214. Пригара, А.М. Геолого-геофизические модели и методики оценки устойчивости природно-технических систем при подземной разработке месторождений солей/А.М. Пригара, А.В. Татаркин, В.В. Середин//Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Серия: Науки о Земле. –2026.–№ 1 (41). – С. 19-36. <https://doi.org/10.25587/2587-8751-2026-1-19-36>

215. Пригара, А.М. Инженерно-геологическая оценка гидротехнических сооружений методами неразрушающего контроля /А.М. Пригара, Р.И. Царев, А.В. Коноплев, О.Г. Пенский, Б.М. Осовецкий // Фундаментальные исследования. – 2014. – №11–2. – С. 348–352.

216. Пригара, А.М. Использование динамических характеристик сейсмических записей для уточнения прочностных характеристик массивов горных пород / А.М. Пригара, И.А. Санфиров // Горное эхо. – 2002. – №3. С.47-50.

217. Пригара, А.М. Мониторинг гидроизолирующих целиков на месторождениях солей / А.М. Пригара, А.А. Жуков, Р.И. Царев, М.В. Скопинов // Горный журнал. – 2024. – №12. – С. 50–57.

218. Пригара, А.М. Определение физико-механических свойств грунтов при оценке состояния гидротехнических сооружений методами неразрушающего контроля / А.М. Пригара, А.В. Татаркин, О.Г. Пенский, Б.М. Осовецкий, А.В. Коноплев // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2012. – №84. – С. 360-372.

219. Пригара, А.М. Практические и методически приложения «базовой» сейсмогеологической модели / А.М. Пригара // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: материалы региональной научно-практической конференции. – 2002. – С.95-98.

220. Пригара, А.М. Решение прямой задачи сейсморазведки МОГТ для соляной толщи с различными системами наблюдения / А.М. Пригара // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: материалы региональной научно-практической конференции. – 2001. – С. 202-204.

221. Пригара, А.М. Сейсмический снос и дифракции на шахтных сейсмических разрезах / А. М. Пригара, А. А. Жуков, Р. И. Царев, В. В. Ворошилов // Инженерная и рудная Геофизика 2023: Сборник материалов 19-й научно-практической конференции и выставки, Санкт-Петербург. – Москва: ООО «ЕАГЕ ГЕОМОДЕЛЬ», – 2023. – С. 535-542.

222. Пригара, А.М. Сейсмомоделирование преломленных волн / А.М. Пригара, И.А. Санфиров // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: материалы региональной научно-практической конференции. – 1997. – С. 177.

223. Пригара, А.М. Совершенствование технологии шахтной сейсморазведки/А.М. Пригара, В.А. Ворошилов, А.А. Жуков, Р.И. Царев, И.Ю. Пушкарёва//Материалы международной научно-практической конференции «Инженерная и рудная геофизика 2021». – Геленджик, 2021.

224. Пригара, А.М. Шахтная сейсморазведка на месторождениях солей (на примере ВКМС) / А.М. Пригара, Р.И. Царев, В.А. Ворошилов, А.А. Жуков. – Пермь. – 2024. – 182 с.

225. Путилов, И. С. Научное обоснование вероятностно-статистических методов прогноза нефтегазоносности структур в условиях высокоизученных территорий : специальность 25.00.10 «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Иван Сергеевич Путилов ; Пермский государственный национальный исследовательский университет. - Пермь, 2016. - 369 с.

226. Пушкарева, И.Ю. Опытные геофизические работы по разработке методики поисков полостей в солевых залежах / И.Ю. Пушкарева, А.А. Жуков, Р.И. Царев, А.М. Пригара // Теория и практика разведочной и промысловой геофизики: материалы международной научно-практической конференции. – 2014. – С. 135–141.

227. Работнов, Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела / Ю. Н. Работнов. – Москва : Наука, 1979. – 744 с.

228. Рагозин, А. Л. Природные опасности России. Оценка и управление природными рисками. Тематический том / А. Л. Рагозин. – Москва : КРУК, 2003. – 320 с.

229. Рагозин, А. Л. Региональная оценка карстовой опасности и риска / А. Л. Рагозин, В. А. Елкин // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2003. – № 4. – С. 33–52.

230. Рагозин, А.Л. Основные подходы к организации мониторинга природно-технических систем с целью снижения ущерба от природных и техноприродных катастроф / А.Л. Рагозин // Разработка концепции мониторинга природно-технических систем: в 2-х томах. – М.: ВНИИФТРИ, 1993. – Т.1. – С. 84–90.

231. Раевский, В. И. Научные и методические основы разведки месторождений калийных солей СССР : специальность 04.00.15 «Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых» : диссертация на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук / Виталий Иванович Раевский ; Ленинградский горный институт им. Плеханова. – Ленинград, 1977. – 399 с.

232. Ребрик, Б. М. Эффективность и качество бурения инженерно-геологических скважин / Б. М. Ребрик, Л. И. Куник. – Москва: Недра, 1978. – 128 с.

233. Ревзон, А. Л. Картографирование состояния геотехнических систем / А. Л. Ревзон. – М.: Недра, 1992. – 223 с.

234. Розовский Л. Б. Инженерно-геологические прогнозы и моделирование / Л. Б. Розовский, И. П. Зелинский, В. М. Воскобойников. – Киев Одесса : Вища школа, 1987. – 208 с.

235. Саваренский, И. А. Руководство по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития карста / И. А. Саваренский, Н. А. Миронов. – Москва : ПНИИС Госстроя России, 1995. – 167 с.

236. Савелов, Р. П. Вопросы теории и практики применения сейсморазведки МОГТ / Р. П. Савелов. – Иркутск : Издательство Иркутского университета, 1986. – 172 с.

237. Савич, А. И. Сейсмоакустические методы изучения массивов скальных пород / А. И. Савич, В. И. Коптев, В. Н. Никитин, З. Г. Ященко. – Москва : Недра, 1969. – 328 с.

238. Салов, Ю. З. Инженерные сооружения и основы строительного производства : учебник для ВУЗов / Ю. З. Салов, Г. В. Замятин. – Ленинград : Стройиздат, 1989. – 367 с.

239. Санфиров, И.А. Геофизические исследования грунтовой плотины / И.А. Санфиров, А.Г. Ярославцев, Ю.И. Степанов, А.М. Пригара // Инженерные изыскания. – 2008. – №3. – С. 82-85.

240. Санфиров, И.А. Рудничные задачи сейсморазведки МОГТ / И. А. Санфиров. – Екатеринбург : УрО РАН, 1996 г. – 167 с.

241. Санфиров, И.А. Сейсморазведочные исследования водозащитной толщи Верхнекамского месторождения калийных солей / И.А. Санфиров, А.И. Бабкин, Г.Ю. Прийма, А.Г. Ярославцев, А.М. Пригара, К.Б. Фатькин // Горный журнал. – 2008. – №10. С. 45-48.

242. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2023614650 Российская федерация. Расчет сдвигов для разделения отражений в способе ПВРО Shifts : № 2023613345 : заявл. 16.02.2023 : опубликовано 03.03.2022 / Пригара А.М., Ворошилов В.А., Жуков А.А., Царев Р.И. ; заявитель АО «ВНИИ Галургии». – 1 с.

243. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2022666990 Российская федерация. Программа контроля, документирования и экспресс-обработки данных полевых сейсморазведочных работ EJ. Версия 2.0 : № 2022666193 : заявл. 31.08.2022 : опубликовано 13.09.2022 / Ворошилов В.А., Царев Р.И., Пригара А.М., Жуков А.А. ; заявитель АО «ВНИИ Галургии». – 1 с.

244. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2020610268 Российская федерация. Программа обработки шахтных сейсмических данных FastMineProc. Версия 1.0 № 2019667231: заявл. 23.02.2019 : опубликовано 13.01.2020 / Пригара А. М., Ворошилов В. А., Жуков А. А., Шусткина И. Ю., Царев Р.И. ; заявитель АО «ВНИИ Галургии». – 1 с.

245. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2020610568 Российская федерация. Программа атрибутного анализа AtAn. Версия 1.0 : № 2019667160 : заявл. 23.12.2019 : опубликовано 16.01.2020 / Р.И. Царев, В.А. Ворошилов, А.М. Пригара, А.А. Жуков, И.Ю. Шусткина ; заявитель АО «ВНИИ Галургии». – 1 с.

246. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2020610309 Российская федерация. Программа поиска годографов дифрагированных волн GodFind. Версия 1.0 : № 2019667093 : заявл. 23.12.2019 : опубликовано 13.01.2020 / В.А. Ворошилов, А.М. Пригара, Р.И. Царев, А.А. Жуков, И.Ю. Шусткина ; заявитель АО «ВНИИ Галургии». – 1 с.

247. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2020660506 Российская федерация. Программа контроля, документирования и экспресс-обработки данных полевых сейсморазведочных работ EJ. Версия 1.0 : № 2020619619 : заявл. 26.08.2020 : опубликовано 04.09.2020 / В.А. Ворошилов, А.М. Пригара, Р.И. Царев, А.А. Жуков, И.Ю. Пушкарёва ; заявитель АО «ВНИИ Галургии». – 1 с.

248. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2022612956 Российская федерация. Программа решения прямой задачи сейсморазведки для впередизабойного зондирования FS : № 2022611644 : заявл. 08.02.2022 : опубликовано 01.03.2022 / А.М. Пригара, В.А. Ворошилов, А.А. Жуков, Р.И. Царев ; заявитель АО «ВНИИ Галургии». – 1 с.

249. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2022612952 Российская федерация. Программа решения обратной задачи сейсморазведки для впередизабойного зондирования FS : № 2022611642 : заявл. 08.02.2022 : опубликовано 01.03.2022 / А.М. Пригара, В.А. Ворошилов, А.А. Жуков, Р.И. Царев ; заявитель АО «ВНИИ Галургии». – 1 с.

250. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2022683171 Российская федерация. Программа для проведения шахтной пространственной миграции в глубинной области MSDM : № 2022682063 : заявл. 17.11.2022 : опубликовано 01.12.2022 / А.М. Пригара, В.А. Ворошилов, Р.И. Царев, А.А. Жуков ; заявитель АО «ВНИИ Галургии». – 1 с.

251. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2023614450 Российская федерация. Программа расчета статических поправок StatPopr : № 2023613088 : заявл. 16.2.2023 : опубликовано 01.03.2023 / Р. И. Царев, В. А. Ворошилов, А. А. Жуков, А. М. Пригара ; заявитель АО «ВНИИ Галургии». – 1 с.

252. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2024660547 Российская федерация. Программа создания протоколов для 2D и 3D электротомографии ERTProto : № 2024619001 : заявл. 24.04.2024 : опубликовано 08.05.2024 / В. А. Ворошилов, А. А. Жуков, Р. И. Царев, А. М. Пригара ; заявитель АО «ВНИИ Галургии». – 1 с.

253. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2024684447 Российская федерация. Программа привязки данных сейсморазведки PDS : № 2024682733 : заявл. 30.09.2024 : опубликовано 17.10.2024 / Р.И. Царев, В.А. Ворошилов, А.А. Жуков, А.М. Пригара ; заявитель АО «ВНИИ Галургии». – 1 с.

254. Сейсморазведка: справочник геофизика. В двух книгах / Под ред. В.П. Номоконова. – Москва : Недра, 1990. – 336 с.

255. Сенин, Л. Н. Новые способы, аппаратура и устройства, повышающие эффективность сейсмических исследований : специальность 25.00.10 «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Лев Николаевич Сенин ; Институт геофизики Уральского отделения РАН. – Екатеринбург, 2009. – 284 с.

256. Сеннов, А.С. Использование информационных технологий при исследовании подземных вод верхнекамского месторождения калийно-магниевого солей / А.С. Сеннов, А.В. Мухаметдинов, А.И. Мясиченко, А.В. Калугин // Горный журнал. – 2021. – № 4. – С. 63-68.

257. Сеннов, А.С. Особенности использования информационных технологий при исследовании подземных вод верхнекамского месторождения калийных солей / А.С. Сеннов, А.В. Мухаметдинов // Современные тенденции в области теории и практики добычи и переработки минерального и техногенного сырья. Материалы международной научно-практической конференции, приуроченной к 90-летию со дня основания института "Уралмеханобр". – 2019. – С. – 103-106.

258. Сергеев Е.М. Теоретические основы инженерной геологии. Механико-математические основы / Е.М. Сергеев. – Москва: Недра, 1986. – 254 с.

259. Середин, В. В. Исследование инженерно-геологических условий проходки шахтных стволов при разработке Верхнекамского калийного месторождения : специальность 04.00.07 «Инженерная геология, мерзловедение и грунтоведение» диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук / Валерий Викторович Середин ; Пермский государственный университе. – Пермь, 1985. – 262 с.

260. Симчера, В.М. Методы многомерного анализа статистических данных: учеб. Пособие / В.М. Симчера. – Москва : Финансы и статистика, 2008. – 400 с.

261. Синянский, И. А. Типология зданий : учебник для студ. Учреждений сред. проф. Образования / И. А. Синянский, Н. И. Манешина. – Москва : Издательский центр «Академия», 2014. – 288 с.

262. СП 116.13330.2012. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 22–02–2003 = Engineering protection of territories, buildings and structures from dangerous geological processes. Basic principles : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) от 30 июня 2012 г. N 274 : дата введения 01.01.2013 / Разработан НИИОСП им. Н.М. Герсевича. – Москва : Стандартинформ, 2013. – Текст : непосредственный.

263. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений = Soil bases of buildings and structures : издание официальное : утвержден Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 16 декабря 2016 г. N 970/пр : дата введения 17.06.2017 / Разработан научно-исследовательским, проектно-изыскательским и конструкторско-технологическим институтом оснований и подземных сооружений им. Н.М. Герсеванова (НИИОСП им. Н.М. Герсеванова) - институтом АО "НИЦ "Строительство". Москва : Стандартинформ, 2017. – Текст : непосредственный.

264. СП 446.1325800.2019. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ = Engineering geological survey for construction. General regulations for execution of work : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 5 июня 2019 г. № 329/пр : дата введения 06.12.2019 / Разработан Ассоциацией «Инженерные изыскания в строительстве». – Москва : Стандартинформ, 2019. – Текст : непосредственный.

265. СП 47.13330.2016. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96 = Engineering survey for construction. Basic principles : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 30 декабря 2016 г. № 1033/пр : дата введения 01.07.2017 / Разработан Ассоциацией «Инженерные изыскания в строительстве». – Москва : Стандартинформ, 2017. – Текст : непосредственный.

266. СП 91.13330.2012. Подземные горные выработки = Underground mine workings : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Министерством регионального развития Российской Федерации от 30 июня 2012 г. № 283 : актуализированная версия «СНиП II–94–80 Подземные горные выработки» : дата введения 01.01.2013 / Разработан Научно-исследовательским институтом горной механики и маркшейдерского дела – межотраслевым научным центром ВНИМИ ОАО «ВНИМИ». – Москва : Стандартинформ, 2012. – Текст : непосредственный.

267. Спасский, Б. А. Изучение и учет верхней разреза в сейсморазведке : : специальность 04.00.12 «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых» : диссертация на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук / Борис Алексеевич Спасский ; Уральский горный институт им. Вахрушева. – Екатеринбург, 1992. – 278 с.

268. Строкова, Л. А. Научно-методические основы численного прогноза деформирования грунтовых оснований : специальность 25.00.08 «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение» : диссертация на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук / Людмила Александровна Строкова ; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск, 2011. – 265 с.

269. Сысоев, А. П. Обоснование параметров системы полевых наблюдений МОГТ 2D / А. П. Сысоев // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2020. – №3. – С. 59-65

270. Сысоев, А. П. Отдельные вопросы динамической инверсии волнового поля / А. П. Сысоев, С. А. Зайцев // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2023. – №3. – С. 52-58.

271. Тагильцев, С. Н. Трение, деформация и сила тяжести как базовые понятия геомеханики / С. Н. Тагильцев // Горный журнал. – 2014. – № 6. С. 85-93.

272. Татаркин, А. В. К оценке опасности карстово-суффозионных процессов / А. В. Татаркин, П. А. Красильников, О. Ю Мещерякова, Д. В. Ермаков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. № 10. – С. 117–127.

273. Татаркин, А. В. Оценка и прогноз развития опасных природно-техногенных процессов на урбанизированных территориях : специальность 25.00.08 «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Алексей Викторович Татаркин ; ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет». – Пермь, 2020, – 291 с.

274. Татаркин, А.В. Инженерно-геофизические исследования в неблагоприятных климатических условиях / А.В. Татаркин, А.М. Пригара //Инженерные изыскания. – 2012. – №11. – С. 20-24.

275. Теннисон, Л. О. К методике оценки деформированного состояния пород, слагающих водозащитную толщу в краевой части мульды сдвижения / Л.О. Теннисон // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 3. – С. 317–328.

276. Теоретические основы инженерной геологии. Механико-математические основы / под ред. Е.М. Сергеева. Москва : Недра, 1986. 254 с.

277. Терентьев В. Б. Определение времени устойчивости междупластовых потолочин для условий сближенного залегания сильвинитовых пластов Усольского калийного комбината // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 2. – С. 295–308. -11

278. Титов, К. В. Электрокинетические явления в горных породах и их применение в геоэлектрике : специальность 25.00.10 «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых» : диссертация на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук / Константин Владиславович Титов ; Всероссийский научно-исследовательский институт разведочной геофизики им. А. А. Логачева (ВИРГ–Геофизика). – Санкт-Петербург, 2003. – 198 с.

279. Толмачев, В. В. Вероятностный подход при оценке устойчивости закарстованных территорий и проектировании противокарстовых мероприятий / В. В. Толмачев // Инженерная геология. – 1980. – № 3. – С. 98–107.

280. Толмачев, В.В. О допустимых рисках строительства в карстовых районах / В. В. Толмачев // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2007. – № 5. – С. 19–21.

281. Трофимов, В. Т. Базовые понятия инженерной геологии и экологической геологии: 280 основных терминов/ В. Т. Трофимов, В. А. Королев, М. А. Харькина и др. – Москва : ООО «Геомаркетинг», 2012. – 320 с.

282. Указания по защите рудников от затопления и охране подрабатываемых объектов в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей (технологический регламент). – СПб., 2014. – 130 с.-22

283. Указания по защите рудников от затопления и охране подрабатываемых объектов подрабатываемых объектов на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей. ПАО «Уралкалий». Введены в действие приказом ПАО «Уралкалий» № 525 от 21.03.2017.

284. Уткин М. М. Динамика развития подземных и поверхностных проявлений карста и методика оценки их опасности. Москва : Наука, 2019. – 117 с.

285. Феллер, Е. Н. Прогнозирование изменения инженерно-геологических условий при ведении очистных работ на Яковлевском руднике (Яковлевское месторождение богатых железных руд, КМА) : специальность 25.00.08 «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение» : диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук / Екатерина Николаевна Феллер ; Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». – Санкт-Петербург, 2014. – 241 с.

286. Филимонов, К. А. Технология подземных горных работ / К. А. Филимонов, В. А. Карасев. – Кемерово : КузГТУ, 2013. – 109 с.

287. Фоменко, И. К. Методология оценки и прогноза оползневой опасности : специальность 25.00.08 «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение» : диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук / Игорь Константинович Фоменко ; Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе. – Москва, 2014. – 320 с.

288. Халафян, А.А. STATISTICA 6. Статистический анализ данных / А.А.Халафян 3-е изд. Учебник – Москва : ООО «Бином-Пресс», 2007 г. – 512 с.

289. Хоменко В.П., Коломенский Е.Н. Влияние подземных полостей на состояние вышележащих дисперсных пород // Промышленное и гражданское строительство. – 2000. – № 8. – С. 39–41.

290. Хоменко, В. П. Закономерности и прогноз суффоизационных процессов : специальность 25.00.08 «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение» : диссертация на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук / Виктор Петрович Хоменко ; Производственный и научно-исследовательский институт по инженерным изысканиям в строительстве (ФГУП «ПНИИИС») Госстроя России. – Москва, 2004. – 216 с.

291. Царев, Р.И. Влияние статических поправок на результаты скоростного анализа при сейсморазведке высокого разрешения / Р.И. Царев, А.М. Пригара, А.А. Жуков // Материалы 26-ой научно-практической конференции по вопросам

геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа «Геомодель 2024». – Пермь, 2024.

292. Царев, Р.И. Возможности шахтной сейсморазведки на поперечных волнах / Р.И. Царев, А.М. Пригара, А.А. Жуков // Материалы международной научно-практической конференции «Инженерная и рудная геофизика 2019». – Геленджик, 2019.

293. Царев, Р.И. Метод сейсмического просвечивания для изучения состояния фундаментов / Р.И. Царев, А.М. Пригара // Теория и практика разведочной и промысловой геофизики: материалы международной научно-практической конференции. – 2015. – С. 216–220.

294. Царев, Р.И. Методика выделения геологических неоднородностей при проведении поверхностной сейсморазведки основанная на конечно-разностном численном моделировании / Р.И. Царев, А.М. Пригара, В.А. Ворошилов // Материалы международной научно практической конференции «Инженерная и рудная геофизика 2021». – Геленджик, 2021.

295. Царев, Р.И. Опыт применения георадара при обследовании оснований надшахтных зданий калийных рудников / Р.И. Царев, В.В. Тарасов, А.А. Жуков, А.М. Пригара // Геотехника. – 2021. – №4. – С. 80–91.

296. Царев, Р.И. Технология и особенности проведения поверхностной сейсморазведки на Верхнекамском месторождении солей / Р.И. Царев, А.А. Жуков, А.М. Пригара, Д.Н. Шкуратский // Горный журнал. – 2021. – №4. – С. 17–26.

297. Цветков, Г. А. Исследование возможности усовершенствования источника сейсмических колебаний / Г. А. Цветков, В. И. Костицын, Ю. П. Петров // Каротажник. – 2010. – № 7 (196). – С. 87-95.

298. Чайковский, И. И. Новый генетический тип зон выщелачивания в солях Верхнекамского месторождения калийных солей: гидрохимические, минералогические / И. И. Чайковский, О. В. Коротченкова, Д. Е. Трапезников // Литология и полезные ископаемые. – 2019. – № 4. – С. 337–350.

299. Чаповский Е.Г. Инженерная геология (основы инженерно-геологического изучения горных пород) / Е.Г. Чаповский. – Москва: Высшая школа, 1975. – 296 с.

300. Чернопазов, Д. С. Влияние соленосных глин на устойчивость горных выработок в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей : специальность 25.00.20 «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Дмитрий Сергеевич Чернопазов ; Тульский государственный университет. – Пермь, 2013, – 156 с.

301. Чуринов, М. В. Справочник по инженерной геологии / Под ред. М. В. Чуринова. – Москва : Недра, 1981. – 531 с.

302. Шерифф, Р. Сейсморазведка. Обработка и интерпретация данных / Р. Шерифф, Л. Гелдарт. – Москва : МИР, 1987. – 400 с.

303. Шумилов А. В. Создание модульной системы обработки информации и специальных технологических решений для повышения эффективности геофизических исследований наклонно-направленных скважин : специальность 25.00.10 «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Александр Владимирович Шумилов ; Пермский государственный национальный исследовательский университет. – Пермь, 2021. – 288 с.

304. Ядзинская, М.Р. Математические методы в гидрогеологии и инженерной геологии : учебное пособие / М.Р. Ядзинская ; Пермский государственный национальный исследовательский университет. – Электронные данные. – Пермь, 2022. – Часть 1. – 6,3 Мб ; 92 с. – Режим доступа: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/Yadzinskaya-Matematicheskie-Metody-V-Gidrogeologii-I-Inzhenernoj-Geologii.pdf>

305. Andrejchuk, V. Collapse above the world's largest potash mine (Ural, Russia) / V Andrejchuk // International Journal of Speleology. 2002. Vol. 31. No 1. Pp. 8.

306. ANSYS. Универсальная программная система анализа методом конечных элементов. Руководство пользователя. Режим доступа : <http://www.ansys.com>

307. Bullock, S.E. Some problems associated with past mining at a mine in the Witbank coalfield, South Africa / S.E. Bullock, F.G. Bell // Environmental Geology. – 1997. – Vol. 33. – № 1. – P.61–71.

308. Gendzwill, D.J. High-resolution seismic reflections in a potash mine / D. J. Gendzwill, Brehm Randy // *Geophysics*. – 1993. – vol. 58, № 5. – P. 741-748.
309. Jackson, M. P. A. Salt tectonics. Principles and practice / Martin P. A. Jackson, Michael R. Hudec. – Cambridge : Cambridge University press, 2017. – 498 p.
310. Kalsnes, B. Managing geological risk / B. Kalsnes, A. Nadim, S. Lacasse // *Geologically Active*. London: CRC Press. – 2010. – P. 111–126.
311. Kashnikov, Yu A. Solving the problems of exploitation safety of potassium salt deposit based on joint application of geophysical and geomechanical studies / Yu A Kashnikov, D V Shustov, A O Ermashov, O O Lebedeva, A A Zhukov, A M Prigara // *IOP Conference Series: Earth And Environmental Science*. – 2021. – P. 012084.
312. Malovichko, A. A. Multiscale seismicity at potash mines. Fifteen years of seismic monitoring at Verkhnekamskoe Deposit / A.A. Malovichko, D.A. Malovichko, R.A. Dyagilev, D.Y. Shulakov // *Rockbursts and seismicity in mine*. Obninsk-Perm: 2013. Pp. 463–473.
313. Park, J.K. A Review of Urban Mining in the Past, Present and Future / J. K. Park, J. Mahoney, T. Clark, N. Krueger // *Advances in Recycling & Waste Management*. – 2017. – 2:127. – DOI:10.4172/2475-7675.1000127.
314. Prigara, A. M. Detailed study of structure and composition of waterproof strata by mine seismic survey at the Verkhnekamskoe salt deposit / A. M. Prigara, D. S. Gribkov, A. A. Zhukov, R. I. Tsarev // *Eurasian Mining*. – 2023. – No. 2. – P. 18-22.
315. Prugger, F. F. Water problems in Saskatchewan potash mining – what can be learned from them? / F. F. Prugger, A. F. Prugger // *CIM Bulletin*. – 1991. – Vol. 84. – No 945. – pp. 58-66.
316. Qin X. S., Cao H., Guo L. J. Sensitivity analysis of factors influencing pillar stability in the deep stope of underground salt mine // *China Rock 2020*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020, vol. 570, no. 2, article 022002. DOI: 10.1088/1755-1315/570/2/022002. -6
317. RadExPro. Руководство пользователя. ООО «Деко-геофизика СК». Москва, 2022.
318. Salamon M. D. G. Strength of coal pillars from back-calculation / 37th U.S. Symposium on Rock Mechanics, Vail Rocks. 1999, pp. 29–36. -10

319. Sanfirov, I. Seismic wave images for different stages of the karst process development / I. Sanfirov, A. Yaroslavtsev, G. Prima, A. Babkin, A. Prigara // 67th European Association of Geoscientists and Engineers: EAGE Conference and Exhibition, incorporating SPE EUROPE 2005. – 2005. – P. 2427–2430

320. Sanfirov, I.A. Near surface geophysical investigation of the 16th century fortress deformation reasons / I.A. Sanfirov, A.M. Prigara, Y.I. Stepanov, G.N Timofeeva // Saint Petersburg 2006 International Conference and Exhibition. – 2006. – P. 113-122.

321. Sankovsky A. A., Aleksenko A. G., Nikiforov A. V. Practical experience analysis: superimposed seams series mining at the Verkhnekamsk potassium-magnesium salts deposit applying room-and-pillar mining method // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2018, vol. 9, no. 6, pp. 715–728. -3

322. Tesseral 2D. Многопараметрическая числовая среда для сейсмического моделирования, обработки, QC, планирования и интерпретации. Руководство пользователя. Режим доступа: <http://www.tesseral-eo.com/documentation/ru/tesseral2d/UserManual2D-ru.pdf>.

323. Tsarev, R.I. Monitoring of geological environment during mining using land and in-mine seismic surveys / R.I. Tsarev, A. M. Prigara, A. A. Zhukov // Eurasian Mining. – 2024. – No. 2. – P. 17-21.

324. Voroshilov, V.A. Integration of Surface and Mine Gravity Data for Localization Structural Faults on the Verkhnekamskoe Potassium-Magnesium Salt Deposit / V.A. Voroshilov, V.I. Kostitsyn, A.A. Zhukov, A.M. Prigara, R.I. Tsarev, I.Yu. Pushkareva // Science and Global Challenges of the 21st Century – Science and Technology. Springer. – 2021. – P. 304–311.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Справки и акты внедрения результатов диссертационного исследования от производственных, проектных, научных и образовательных организаций



По месту требования

Публичное акционерное общество
«УРАЛКАЛИЙ»

Пятилетки ул., д. 63, г. Березники,
Пермский край, Российская Федерация, 618426
телефон + 7 (3424) 296059, факс + 7 (3424) 296100
Internet: <http://www.uralkali.com>
ОКПО 00203944, ОГРН 1025901702188,
ИНН/КПП 5911029807/997550001

27.11.2025 № 02-19/11748

на № _____ от _____

СПРАВКА О ВНЕДРЕНИИ

результатов диссертационной работы Пригары А.М.

Представленные в диссертационной работе Пригары Андрея Михайловича «Научно-методические основы оценки и прогноза устойчивости природно-технических систем при подземной разработке соляных месторождений» (специальность 1.6.7 – Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение) результаты научных исследований прошли широкую апробацию в условиях Верхнекамского месторождения солей на рудниках ПАО «Уралкалий».

Научно-методические основы, разработанные Пригарой А. М., на постоянной основе применяются при выполнении научно-исследовательских работ, выполняемых АО «ВНИИ Галургии» для ПАО «Уралкалий» в ходе решения задач по оценке и прогнозу инженерно-геологических условий водозащитной толщи, устойчивости гидроизолирующих целиков, а также для решения ряда других геологических и горнотехнических задач.

Результаты практического применения научно-методических основ, представленных в диссертации Пригары А.М., позволили получить ряд новых геологических сведений о строении Верхнекамского месторождения солей, скорректировать положение аномалии первой группы на одном из соляных куполов, оценить и спрогнозировать устойчивость природно-технических систем на ряде рудников ПАО «Уралкалий». Научные разработки Пригары А.М. использованы при выполнении 18 научно-исследовательских работ различного масштаба.

Заместитель директора технической дирекции

Зданович Михаил Яковлевич



Акционерное общество
«ВНИИ Галургии»

Сибирская ул., д. 94, г. Пермь,
Пермский край, Российская Федерация, 614002
телефон +7 (342) 2100810
Internet: vniig@uralkali.com, www.gallurgy.ru
ОКПО 04643568, ОГРН 1025900891180,
ИНН/ КПП 5904001952/590401001

По месту требования

21.11.2025 № 025121-003

На № _____ от _____

Справка об использовании и внедрении
результатов диссертационной работы
Пригары А.М.

Результаты научных исследований, представленные в диссертационной работе Пригары Андрея Михайловича «Научно-методические основы оценки и прогноза устойчивости природно-технических систем при подземной разработке соляных месторождений» по специальности 1.6.7 – Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение, характеризуются как разработки, ценные с научной и практической точек зрения.

Сформированные Пригарой А. М. научно-методические основы оценки и прогноза устойчивости природно-технических систем при подземной разработке соляных месторождений, прошли широкую апробацию в условиях Верхнекамского месторождения солей. Они внедрены в процесс выполнения научно-исследовательских работ, выполняемых для ПАО «Уралкалий» при решении задач по оценке инженерно-геологических условий водозащитной толщи, устойчивости гидроизолирующих целиков и природно-технических систем в целом. В частности, при выполнении научно-исследовательских работ в АО «ВНИИ Галургии» используются разработанные Пригарой А.М:

- запатентованный метод шахтной сейсморазведки на поперечных волнах с разделением отражений;
- геофизические, инженерно-геологические и динамические модели природно-технических систем, характерные для месторождений солей;
- карта районирования ВКМС по признаку наличия опасных геологических процессов;
- классификации состояния природно-технической системы «инженерно-геологический массив – подземное сооружение» и гидроизолирующих целиков, в том числе с учетом поведения сейсмических атрибутов;

– методики и программно-алгоритмический комплекс, обеспечивающие оценку и прогноз устойчивости водозащитной толщи, гидроизолирующих целиков, и в целом природно-технических систем при подземной разработке месторождений солей.

Результаты практического применения научно-методических основ, разработанных Пригарой А.М., позволяют значительно повысить безопасность горнодобывающих комплексов и сохранность запасов ископаемых солей, что вносит существенный вклад в экономическое развитие страны.

Директор горно-геологической научной части
АО «ВНИИ Галургии»



М.В. Скопинов

Генеральный директор АО «ВНИИ Галургии»,
кандидат технических наук



Д.Н. Шкуратский

СПРАВКА

о внедрении результатов диссертационной работы Пригары А.М.

Основные результаты диссертационной работы Пригары Андрея Михайловича «Научно-методические основы оценки и прогноза устойчивости природно-технических систем при подземной разработке соляных месторождений» по специальности 1.6.7 – Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение, *представленные:*

- научно-методическими основами оценки и прогноза устойчивости природно-технических систем при подземной разработке соляных месторождений, базирующимися на исследованиях упругих свойств горного массива,
- высокоразрешающим методом шахтной сейсморазведки на поперечных волнах с разделением отражений,
- геофизическими, инженерно-геологическими и динамическими моделями природно-технических систем, характерными для месторождений солей;
- научным подходом к переходу от упругих характеристик к структурной и физико-механической моделям целиков, степени их нагружения и пределу прочности на сжатие слагающих их пород,
- методиками, программным обеспечением и системой практических рекомендаций, обеспечивающими оценку и прогноза устойчивости природно-технических систем при подземной разработке месторождений солей,

используются в учебном процессе ФГАОУ «Пермский государственный национальный исследовательский университет» на кафедре «Инженерной геологии и охраны недр» Геологического факультета в курсе «Геофизические методы в инженерно-геологических и гидрогеологических исследованиях».

Проведенные Пригарой А.М. научные исследования характеризуются как научно-обоснованные разработки, позволяющие в условиях подземной разработки соляных месторождений изучать инженерно-геологические условия, устанавливать наличие опасных инженерно-геологических процессов, оценивать и прогнозировать устойчивость сооружений и природно-технических систем.

И.о.аведующего кафедрой «Инженерной геологии и охраны недр» ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»,
кандидат геолого-минералогических наук, доцент



Т.Г. Ковалева

17 ноября 2025 г.



Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
**ФГАОУ ВО «Пермский государственный
национальный исследовательский университет»**
КАФЕДРА ГЕОФИЗИКИ

614990, г. Пермь, Букирева, 15

Телефоны: (342) 239-65-95, 239-68-43, 239-66-57 Факс: (342) 237-16-11; 239-68-32

E-mail: geophysic@psu.ru, WWW-сервер: <http://www.psu.ru>

Исх. № 61 от «15» ноября 2025 г.

Справка

о внедрении результатов диссертационной работы А.М. Пригары

Результаты диссертационной работы Пригары Андрея Михайловича «Научно-методические основы оценки и прогноза устойчивости природно-технических систем при подземной разработке соляных месторождений» внедрены и используются в учебном процессе ФГАОУ «Пермский государственный национальный исследовательский университет» на кафедре геофизики Геологического факультета в курсе «Сейсморазведка». В частности, в учебном процессе освещаются следующие результаты исследований А.М. Пригары:

- базовые принципы формирования, распространения и регистрации сейсмических волн в условиях полного пространства;
- методика полевых шахтных сейсмических исследований;
- метод шахтной сейсморазведки на поперечных волнах с разделением отражений;
- геофизические, инженерно-геологические и динамические модели природно-технических систем, характерные для месторождений солей;
- научный подход к переходу от упругих характеристик к структурной и физико-механической моделям целиков;
- программное обеспечение и практические рекомендации, обеспечивающие оценку и прогноз устойчивости природно-технических систем при подземной разработке месторождений солей.

Научные исследования А.М. Пригары обеспечивают возможность изучения инженерно-геологических условий, установления наличия опасных инженерно-геологических процессов, оценки и прогноза устойчивости сооружений и природно-технических систем в условиях подземной разработки соляных месторождений.

Заведующий кафедрой геофизики,
д.т.н., доцент

А.В. Шумилов



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ

ПЕРМСКАЯ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ КОМПАНИЯ

От 16.07.2025 № П-1
На № _____ от _____

АКТ

о внедрении результатов диссертационного исследования.

Результаты диссертационного исследования Пригары Андрея Михайловича «Научно-методические основы оценки и прогноза устойчивости природно-технических систем при подземной разработке соляных месторождений» используются в Обществе с ограниченной ответственностью «Пермская геолого-геофизическая компания» при научно-техническом сопровождении деятельности предприятий, осуществляющих инженерные изыскания и добычу полезных ископаемых.

Научные разработки, изложенные в диссертации Пригары А.М. позволяют получать новые сведения об инженерно-геологических условиях массива горных пород, выявлять опасные процессы, связанные с тектоническим строением и физическим состоянием горного массива, прогнозировать инженерно-геологические условия водозащитной толщи и устойчивость гидроизолирующих целиков при подземной разработке месторождений калийно-магниевых солей, что существенно снижает риски возникновения на них аварийных ситуаций и потери устойчивости природно-технических систем.

Директор ООО «ПГГК»

Ключко А.А.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

**«Пермский национальный исследовательский
политехнический университет»
(ПНИПУ)**

614990, Пермский край, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29.

Тел.: 8(342) 219-80-67. Факс: 8(342) 219-89-27

E-mail: rector@pstu.ru; <http://www.pstu.ru>

ОКПО 02069065 ОГРН 1025900513924 ИНН/КПП 5902291029/590201001

СПРАВКА

об внедрении результатов диссертационной работы Пригары А.М.

В рамках выполнения научно-исследовательской деятельности кафедры «Маркшейдерского дела, геодезии и геоинформационных систем» (МДГиГИС) ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ПНИПУ) применяет научные и практические положения, изложенные в диссертационной работе Пригары Андрея Михайловича «Научно-методические основы оценки и прогноза устойчивости природно-технических систем при подземной разработке соляных месторождений». Результаты диссертационной работы Пригары А.М. использованы при оценке инженерно-геологических условий водозащитной толщи и устойчивости природно-технических систем на территории шахтных полей Березниковских калийных рудоуправлений №2 и №4 ПАО «Уралкалий». Результаты работы апробированы и нашли практическое применение при разработке следующих вопросов:

- высокоразрешающий метод шахтной сейсморазведки на поперечных волнах с разделением отражений;
- геофизические и инженерно-геологические модели природно-технических систем;
- методики оценки физико-механических свойств продуктивной толщи Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей (ВКМКС) и прогноза устойчивости параметров систем разработки.

В ходе исследований, выполненных Пригарой А.М., решена актуальная научная проблема оценки устойчивости природно-технических систем при подземной разработке соляных месторождений, имеющая весомое социально-экономическое и хозяйственное значение. Представленные новые научно-обоснованные решения значительно повышают безопасность отработки ВКМКС, сохранность запасов ископаемых солей. Результаты работы успешно внедрены на кафедре МДГиГИС ФГАОУ ВО «ПНИПУ» при решении различных геомеханических задач.

Проректор по науке и инновациям ПНИПУ

Швейкин А.И.

Заведующий кафедрой «Маркшейдерского дела,
геодезии и геоинформационных систем»
профессор, доктор технических наук

Кашников Ю. А.



19.11.2025



Сертифицировано
«РУССКИМ РЕГИСТРОМ»



ПермПроектИзыскания

Общество с ограниченной ответственностью
614000 г. Пермь, ул. Монастырская, д.14, офис 245
ИНН:5904233880 КПП: 590201001 ОГРН 1105904012125
Р/с 407 028 102 490 900 404 30, БИК 042 202 603, К/с 301 018 109 000 000 006 03,
Волго – Вятский банк ПАО «Сбербанк», г. Нижний Новгород.
Тел. /факс (342) 215-95-60;
E-mail: ppi59@yandex.ru; Сайт: <http://ppi59.ru/>

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы Пригары Андрея Михайловича
«Научно-методические основы оценки и прогноза устойчивости природно-технических систем при подземной разработке соляных месторождений» по специальности 1.6.7 – Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

Результаты диссертационной работы Пригары А.М. применяются в ООО «ПермПроектИзыскания» при выполнении инженерных изысканий по договорам с компаниями-недропользователями, осуществляющими эксплуатацию и подземную разработку Верхнекамского месторождения солей. Применение результатов научных и практических разработок, выполненных автором в ходе описанных в диссертации исследований, обеспечивает возможность изучения инженерно-геологических условий, обнаружения опасных инженерно-геологических процессов, оценки и прогноза устойчивости сооружений и природно-технических систем при подземной разработке соляных месторождений. В частности, в деятельности ООО «ПермПроектИзыскания» используются геофизические и инженерно-геологические модели природно-технических систем, характерные для месторождений солей, методики, программное обеспечение и практические рекомендации, обеспечивающие оценку и прогноза устойчивости природно-технических систем при подземной разработке месторождений солей.

Генеральный директор
ООО «ПермПроектИзыскания»



Язев Павел Геннадьевич

08.08.2025г

ООО «ППИ-ГЕОФИЗИКА»

ИНН 5902227947

КПП 590301001

Телефон +7 (912) 786-50-64

Электронная почта tatianalaskina@ppigeophysics.ru

Р/с 407028108000000005933

в ОАО АКБ "УРАЛ ФД"

К/с 30101 810 8 000 000 00 790

БИК 044030653

ОКПО 12042185

ОГРН 1125902007571

ОКАТО 57401365

ОКТМО 57701000001

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Пригары Андрея Михайловича «Научно-методические основы оценки и прогноза устойчивости природно-технических систем при подземной разработке соляных месторождений»

ООО «ППИ-Геофизика» в своей научной и практической деятельности использует результаты, представленные в диссертационной работе Пригары А.М., в том числе:

- геофизические модели природно-технических систем;
- инженерно-геологические модели природно-технических систем;
- методику прогноза инженерно-геологических условий водозащитной толщи;
- методику устойчивости гидроизолирующих целиков.

Разработанные Пригарой А.М. научно-методические основы оценки и прогноза устойчивости природно-технических систем позволили значительно повысить точность и детальность формируемых моделей инженерно-геологических массивов, тем самым повысить безопасность строительства и эксплуатации сооружений при подземной разработке Верхнекамского месторождения солей.

Директор ООО «ППИ-Геофизика»,

кандидат технических наук



Ласкина Татьяна Андреевна

ООО «ППИ-ГЕОФИЗИКА» ИНН 5902227947, КПП 590301001,
телефон +7 (912) 786-50-64, электронная почта tatianalaskina@ppigeophysics.ru