

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Пермь – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет» и акционерном обществе «ВНИИ Галургии».

Научный консультант:	Татаркин Алексей Викторович доктор технических наук, профессор кафедры инженерной геологии и охраны недр, ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» (г. Пермь)
Официальные оппоненты:	Кутепов Юрий Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией гидрогеологии и экологии научного центра геомеханики и проблем горного производства ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет» (г. Санкт-Петербург) Еманов Александр Федорович, доктор технических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией инженерной сейсмологии Алтае-Саянского филиала Исследовательского центра «Единая геофизическая служба» Российской академии наук (г. Новосибирск) Строкова Людмила Александровна доктор геолого-минералогических наук, профессор, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (г. Томск)
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича Уральского отделения Российской академии наук (г. Екатеринбург)

Защита диссертации состоится «15» октября 2026 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.423.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», по адресу: 620144, г. Екатеринбург, ул. Хохрякова, 85 (III уч. Корпус, ауд. 3326).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте www.ursmu.ru ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет».

Автореферат диссертации разослан «15» июля 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.423.01
доктор геолого-минералогических наук



И.В. Абатурова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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), Каравасва 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-магнєвых 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. Аprobация 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 Engineering (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 1 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.

ЗАЩИЩАЕМЫЕ НАУЧНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

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.

Геофизические исследования позволяют оперативно получать непрерывную по профилю и по площади информацию [1-2, 4-8, 10-14], дополняя таким образом сведения, получаемые при проходке горных выработок [3, 9, 15-36]. Данный вид изыскательских и поисково-разведочных работ на месторождениях солей применялся и применяется очень широко (Вагин В.Б., Кулагов Е.В. (2012-2025), Колесников В.П., Татаркин А.В., 1996-2025, Санфиоров И.А, 1996-2025, и др.). При подземных исследованиях наилучшим соотношением «разрешающая способность» / «дальность исследования» среди геофизических методов обладает шахтная сейсморазведка [15-17], в силу различия акустических свойств самих солей и вмещающих пород её применение для изучения строения месторождений солей вполне обосновано [26].

Для разработки нового эффективного высокоразрешающего метода шахтной сейсморазведки автор провел значительный объем численных экспериментов и физического моделирования [15-17, 20, 25, 30, 33-37]. Эксперименты позволили всесторонне оценить особенности возбуждения, распространения и приема упругих колебаний в условиях полного пространства, характерных для подземных исследований.

Численные эксперименты для моделей различной сложности и детальности выполнены в программах Ansys, Tesseral и FS [51]. В первой из них выполнены расчеты для «тонкослоистых» моделей, при этом относительно простых со структурной точки зрения (рисунок 4) [20, 37]. В программах Tesseral и FS расчеты выполнены для моделей «толстослоистых», но отличающихся при этом довольно сложной структурой [37]. В силу высокой плотности и низкой пористости соляных пород, а также отсутствия свободной воды в массиве, моделирование распространения упругих волн выполнялось с использованием классического волнового уравнения; применение уравнений типа Мориса-Био, учитывающих двухфазную среду, не требуется.

Численные расчёты в программе Ansys указывают на следующие основные выводы.

1. В условиях подземных сооружений при использовании источника упругих колебаний типа «сосредоточенная сила», отмечается четко выраженная направленность распространения упругих волн: продольные (Р) волны имеют наибольшую амплитуду в

направлении воздействия источника, а поперечные (S) волны – в направлении, близком к перпендикулярному к нему.

2. Для соляных месторождений, использование вертикально-направленного источника упругих колебаний приводит к возбуждению Р-волны, распространяющейся вверх и вниз относительно подземного сооружения, однако отраженные волны от вышележащих и нижележащих геологических границ не фиксируются (рисунок 1, а).

3. Использование в такой же геологической ситуации горизонтально-направленного источника приводит к появлению четко выраженных отражений на S-волнах от целевых геологических границ (рисунок 1, б).

Таким образом, по результатам численного моделирования в программе Ansys можно сделать вывод о том, что использование стандартных методик для построения геофизических моделей, адекватно отображающих инженерно-геологические условия не подходит. Методика же, модифицированная с учетом полученных сведений, предоставляет возможность оперативного получения детальных структурных, тектонических и литологических характеристик массивов горных пород. Численные эксперименты для «толстослоистых» моделей, выполненные в программе Tesseral и FS, позволили установить потенциальные преимущества и ограничения модифицированной методики (рисунок 2).

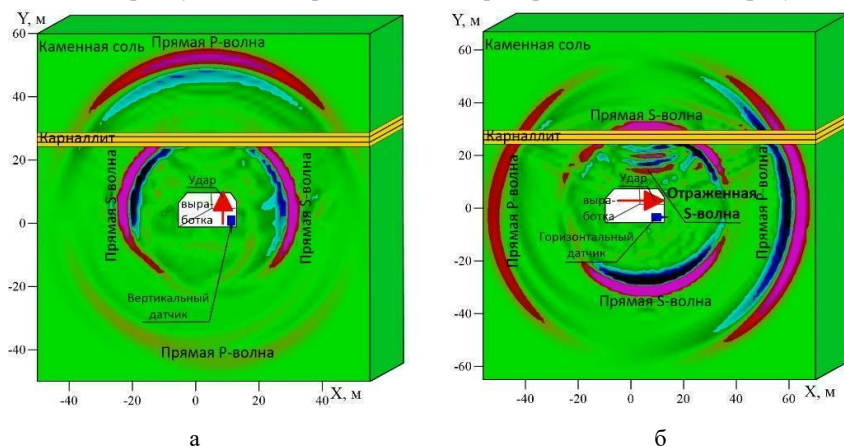


Рисунок 1 – Результаты моделирования распространения упругих волн в программе Ansys для одной из «тонкослоистых» моделей для случаев: а – вертикально-направленного источника, б – горизонтально-направленного источника (по данным автора [20, 37])

К преимуществам относятся широкие возможности в части объективной оценки и прогноза устойчивости природно-технических систем при подземной разработке соляных месторождений. Так, заложенные в исходную модель складки с размерами, начиная с первых метров, и локальные неоднородности диаметром 2 метра, контрастно проявляются в итоговой геофизической модели. К ограничениям нестандартной методики полевых работ

необходимо отнести интерференцию (наложение) отражений, приходящих сверху и снизу (рисунок 2). Преодоление данного ограничения возможно путем разработки эффективного способа разделения отражений. Таким образом, численное моделирование явно указывает на то, что разработка нового метода открывает возможность оперативного получения новых сведений о структурных, тектонических и литологических характеристиках массивов горных пород, взаимодействующих с подземными сооружениями.

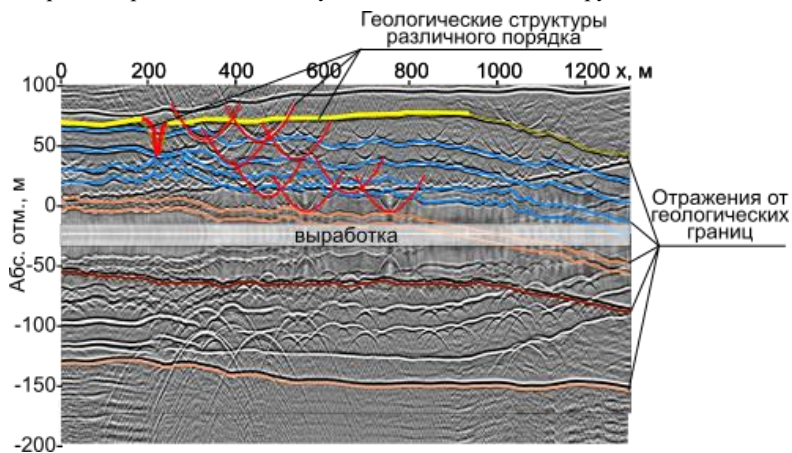


Рисунок 2 – Оценка возможности выделения неоднородностей модифицированной методикой – геофизическая модель позволяет выделить основные геологические границы и геологические структуры различного порядка (по данным автора [37])

Физическое моделирование (натурные исследования) выполнено в двух вариантах – одноуровневом, и двухуровневом. В первом случае источник и приемник упругих колебаний располагались в одной выработке (на одном уровне), во втором случае – в разных выработках, находящихся на разной глубине (на разном уровне).

Результаты одноуровневых исследований показали [37], что при выполнении полевых работ согласно стандартной методике, когда применяются вертикальные сейсмоприемники, установленные в почву выработки, совместно с вертикально-ориентированным возбуждением упругих колебаний в кровлю, выделить четкие отражения от геологических границ не представляется возможным (рисунок 3, а). Применение модифицированной методики полевых работ, при которой используются горизонтальные сейсмоприемники в совокупности с горизонтально-ориентированным источником упругих колебаний, фиксируются интенсивные и контрастные отражения от геологических границ и подземных сооружений, расположенных выше и ниже профиля исследований (рисунок 3, б).

Разноуровневые исследования подтверждают [37], что при возбуждении упругих волн в горизонтальном направлении, поперечные волны распространяются практически

перпендикулярно направлению удара, то есть преимущественно в вертикальной плоскости, при этом их амплитуда примерно на порядок превышает амплитуду продольных волн. Также, как и в предыдущих видах исследований, в данном случае зафиксированы отражения от геологических границ на поперечных волнах, и не зафиксированы отражения на волнах продольных.

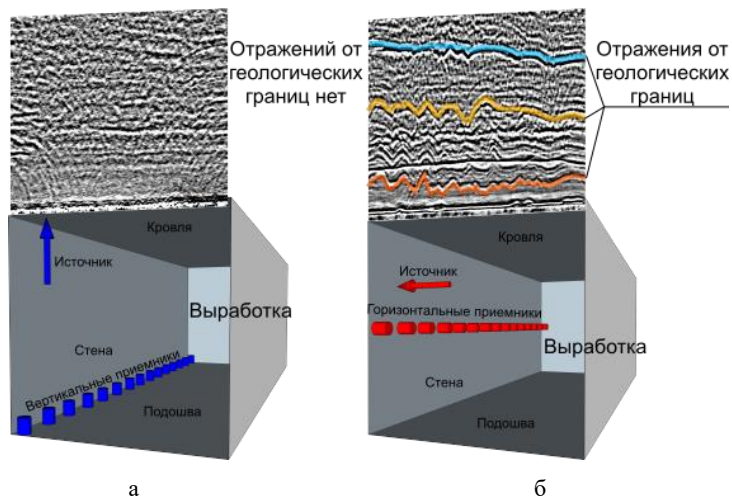


Рисунок 3 – Результаты физического моделирования, одноуровневые исследования с использованием полевых методик: а – стандартной, б – нестандартной. Снизу показаны методики полевых работ, сверху – сейсмические разрезы (по данным автора)

На основании полученных данных разработан новый метод шахтной сейсморазведки на поперечных волнах с разделением отражений (ПВРО) [16, 37, 41]. Основу метода ПВРО (рисунок 4) составляет методика полевых работ, подразумевающая, при исследованиях в вертикальной плоскости, использование горизонтальных сейсмоприемников, устанавливаемых в стену выработки, совместно с горизонтально-направленным источником упругих волн типа «сосредоточенная сила». Еще одним важным отличием предлагаемой методики полевых работ является выполнение исследований с двумя линиями возбуждения. Такой подход позволяет на этапе обработки разделить отражения, приходящие из противоположных полупространств. Параметры возбуждения и регистрации упругих колебаний обоснованы специально проведенными для этой цели опытными работами [37].

Метод ПВРО также включает в себя специально разработанную методику обработки данных [21-22]. Помимо учета общеизвестных особенностей получаемых записей, она также учитывает интерференцию отражений, приходящих из разных полупространств (рисунок 4). Для решения последней проблемы проведены отдельные исследования [14], по

результатам которых разработан математический аппарат, позволяющий с высоким качеством разделить интерферирующие отражения [21-22, 49, 50].

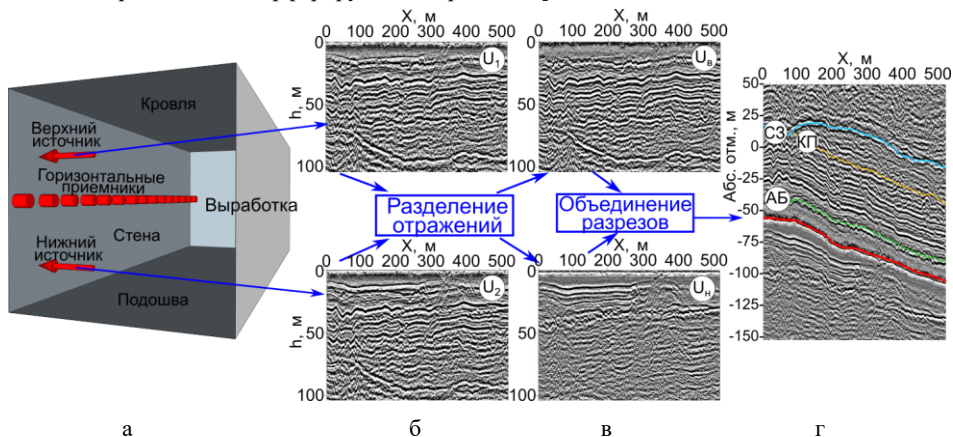


Рисунок 4 – Блок-схема разработанного метода шахтной сейсморазведки: а – схема выполнения полевых работ, б – разрезы для верхней и нижней линий возбуждения, в – разрезы после разделения отражений из нижнего и верхнего полупространства, г – сводный разрез – геофизическая модель ПТС (по данным автора [36])

При непосредственном участии автора создан программно-алгоритмический комплекс, предназначенный для сопровождения полевых работ, обработки и интерпретации получаемых данных, решения прямой и обратной задач сейсморазведки для условий полного пространства. Получены свидетельства о государственной регистрации на двенадцать программ для ЭВМ [42–53]. В ходе опробования метода получен ряд новых сведений об инженерно-геологических условиях, влияющих на состояние ПТС, в том числе доказано существование на территории ВКМС эрозионных врезов и сопутствующих им зон замещения, выявлены неизвестные ранее особенности залегания нижней переходной пачки, пласта МГ, характеристики складчатости в интервале КП [27, 30, 31, 35, 37].

Таким образом, на основании численного моделирования, натурных экспериментов и выявленных закономерностей распространения упругих волн в условиях полного пространства, автором разработан и научно обоснован [19] новый высокоразрешающий метод шахтной сейсморазведки. 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 детальных структурных, тектонических и литологических характеристик массивов горных пород, взаимодействующих с подземными сооружениями. На разработанный метод получен патент на изобретение РФ [41].

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.

Причины большинства аварийных ситуаций на соляных месторождениях до сих пор являются предметом научных дискуссий, но один вывод не подлежит сомнению – специалистам известны далеко не все инженерно-геологические особенности разрабатываемых соляных месторождений. Иначе говоря, формируемые инженерно-геологические модели ПТС далеко не всегда позволяют своевременно выявлять сочетание природных и техногенных факторов, приводящих к разрушительным геологическим процессам. Фактически, причины их активизации и последующего нарушения устойчивости ПТС устанавливаются постфактум (Зубов В.П., 2015, 2019).

Наиболее опасными геологическими явлениями на соляных месторождениях с точки зрения устойчивости ПТС являются: инверсионный рельеф, отмечаемый в кровле солей на куполах соляных поднятий, зоны замещения и ВСД [3, 30, 37], сопровождаемые изменением инженерно-геологического состояния массивов горных пород. Кроме того, в ходе промышленного опробования разработанного метода шахтной сейсморазведки ПВРО, были впервые выявлены неизвестные ранее на ВКМС геологические структуры, называемые каньонообразными эрозионными врезами [30]. Все обнаруженные на сегодняшний день ЭВ находятся в области соляных поднятий в пределах участков инверсионного рельефа. Например, на одном из исследованных участков инверсионный рельеф достигает только кровли карналлитовой пачки (КП), а каньонообразный ЭВ при этом почти достигает сильвинитовой пачки (СП), в пределах которой уже имеются капитальные подземные сооружения (рисунок 5). Очевидно, что данная ситуация несет серьезную опасность для всей ПТС [36]. Для того, чтобы инженерно-геологические модели ПТС наиболее полно учитывали геологическое строение, геоморфологические признаки и структуру горных массивов, необходимо объяснить и обосновать природу и динамику рассмотренных инженерно-геологических условий и опасных процессов и включить их в инженерно-геологические модели ПТС.

С геологической точки зрения, вероятнее всего, первой стадией формирования ЭВ являются трещины отрыва, которые возникают в кровле солей при образовании поднятий. Далее эти трещины достаточно быстро, в геологическом понимании, выщелачиваются до

размеров каньонообразных ЭВ (рисунок 6). Более глубокие и менее многочисленные ЭВ так и остаются каньонообразными, а мелкие и более многочисленные «прорабатываются» подземными водами до чашеобразного или плоского инверсионного рельефа. Через возникшие нарушения в толщу солей проникают флюиды, что приводит к активизации процессов метасоматоза соляных пород. В результате возникают зоны замещения, в пределах которых геомеханические свойства горного массива значительно ухудшаются.

Для обоснования данной гипотезы выполнены соответствующие геомеханические расчеты. Они основаны на известных соотношениях, приближенно определяющих радиальные (σ_r/E) и окружные (σ_ϕ/E) деформации в центре пластины:

$$\sigma_r / E = \sigma_\phi / E = \left(\frac{h}{b}\right)^2 \left[2,86 \left(\frac{f}{h}\right) + 0,976 \left(\frac{f}{h}\right)^2 \right] \quad (1)$$

и на краю пластины:

$$\sigma_r / E = \left(\frac{h}{b}\right)^2 \left[4,40 \left(\frac{f}{h}\right) + 0,476 \left(\frac{f}{h}\right)^2 \right], \quad \sigma_\phi / E = \left(\frac{h}{b}\right)^2 \left[1,32 \left(\frac{f}{h}\right) + 0,145 \left(\frac{f}{h}\right)^2 \right], \quad (2)$$

где E – модуль упругости, σ_r – радиальные и σ_ϕ – окружные напряжения в плоскости пластины, h – толщина, b – длина, f – высота изгиба пластины (рисунок 4).

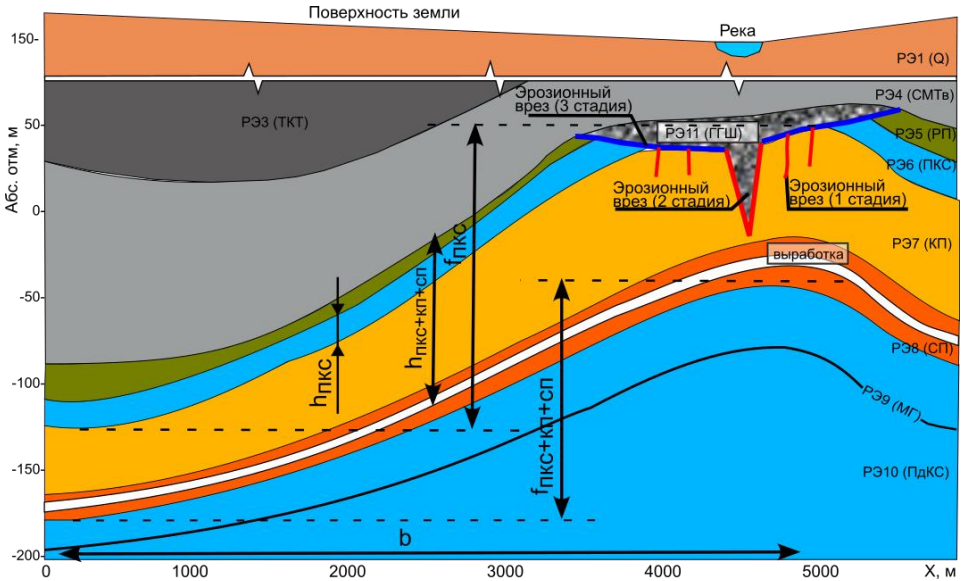


Рисунок 5 – К разработке структурно-тектонической модели соляного поднятия в пределах ВКМС (f – высота изгиба пластины, h – толщина пластины, b – длина пластины (по данным автора [36])

Расчеты для представленной модели реализованы отдельно для толщи ПКС и для

толщи, включающей в себя ПКС, КП и СП. Анализ показывает, что для обоих случаев расчетные деформации для всех трех видов солей достигают и превышают предельные значения, полученные в лабораторных условиях (таблица 1). Таким образом, выполненные исследования подтверждают правильность гипотезы о генезисе ЭВ, инверсионного рельефа, сопутствующих им зон замещения и связи всех этих явлений с ВСД. Это дает возможность включить данные опасные процессы в инженерно-геологические модели ПТС, и выявлять их при изучении и уточнении ИГУ и определении устойчивости ПТС.

Автором предлагается трехстадийная технология построения инженерно-геологической модели ПТС [28]. Базой для первого этапа служит геологическая информация, полученная по результатам бурения поверхностных скважин, а итогом является приближенная инженерно-геологическая модель ПТС с границами ИГЭ и расчетных элементов, построенными с помощью линейной интерполяции между скважинами (рисунок 7, а).

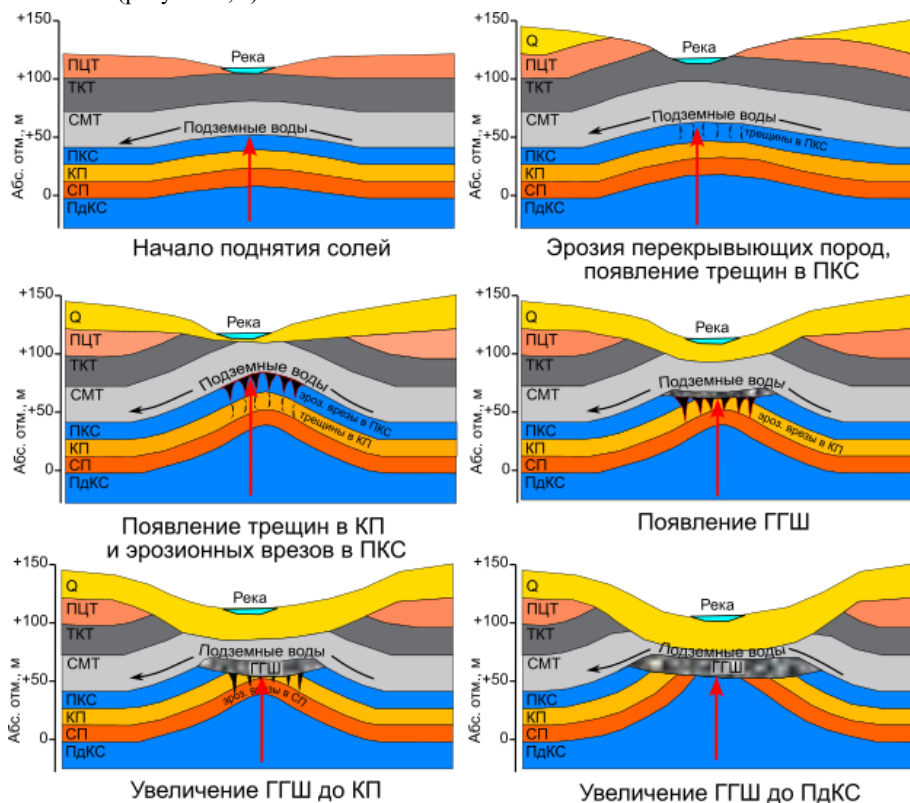


Рисунок 6 – Генезис формирования трещин, эрозионных врезов и инверсионного рельефа в ВЗТ и стадии динамической модели возникновения инверсионного рельефа и ЭВ (по данным автора)

Таблица 1 – Результаты геомеханических расчетов деформаций для модели ПТС

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

На втором этапе инженерно-геологическая модель ПТС уточняется, для чего привлекаются данные геологических наблюдений, полученных при проходке горных выработок. На их основе выявляются закономерности геологического строения, позволяющие строить модели с гораздо более высокой степенью достоверности (рисунок 7, 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. Несмотря на довольно высокую точность моделей, полученных на втором этапе, на их основе весьма сложно предсказать наличие рассматриваемых опасных геологических процессов, если они не вскрыты скважинами или горными выработками.

Дальнейшее повышение детальности инженерно-геологических моделей обеспечивает эффективный в данных геологических условиях метод шахтной сейсморазведки ПВРО, который привлекается для уточнения инженерно-геологических моделей ПТС, в том числе для обнаружения зон замещения, ЭВ, инверсионного рельефа, и определения параметров складчатости (рисунок 7, в) [1, 2, 12, 22, 27, 36].

Благодаря различию упругих свойств солей различного состава и вмещающих горных пород (Кашников Ю.А., Лебедева О.О., 2021), специально разработанным методикам выполнения полевых работ и камеральной обработки, данный метод в подземных условиях позволяет достичь разрешающей способности порядка 1-2 метров. Это открывает путь для оперативного получения детальных структурных, тектонических и литологических характеристик горных пород, взаимодействующих с подземными сооружениями по различиям в упругих свойствах горных пород. Так, благодаря разработанному методу в

инженерно-геологические модели ВКМС включены эрозийные врезы, выявленные неизвестные ранее особенности залегания нижней переходной пачки, маркирующей глины, характеристики складчатости и зоны замещения в интервале КП, уточнены морфологические особенности инверсионного рельефа (рисунок 8) [19, 37].

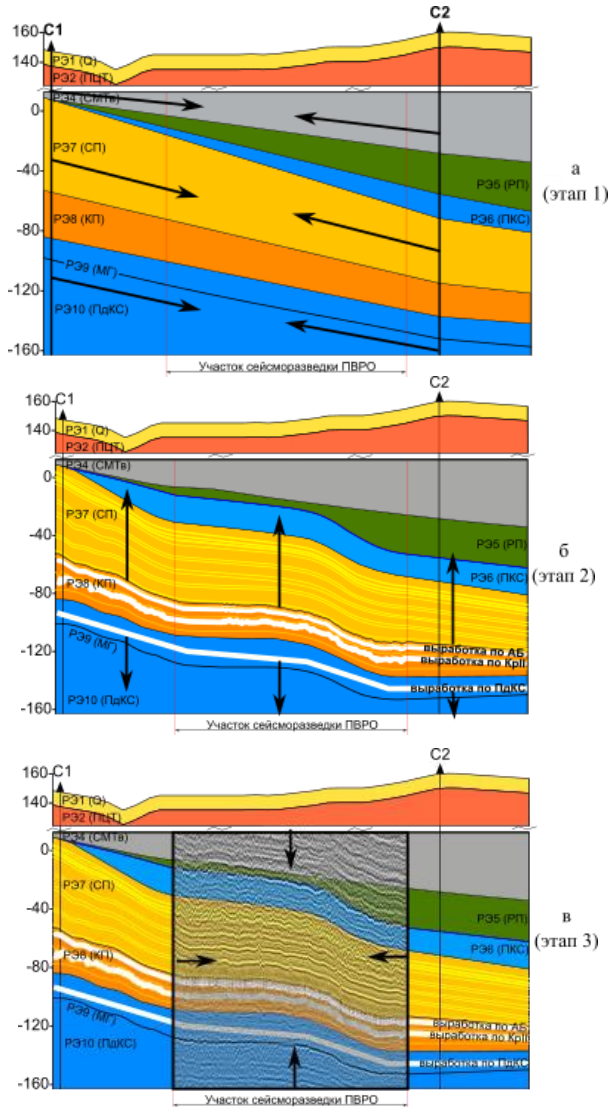


Рисунок 7 – Этапы построения инженерно-геологических моделей ПТС: а – по данным бурения скважин, б – с учетом результатов проходки горных выработок, в – с учетом результатов шахтных сейсмозащитных работ ПВРО (по данным автора [36])

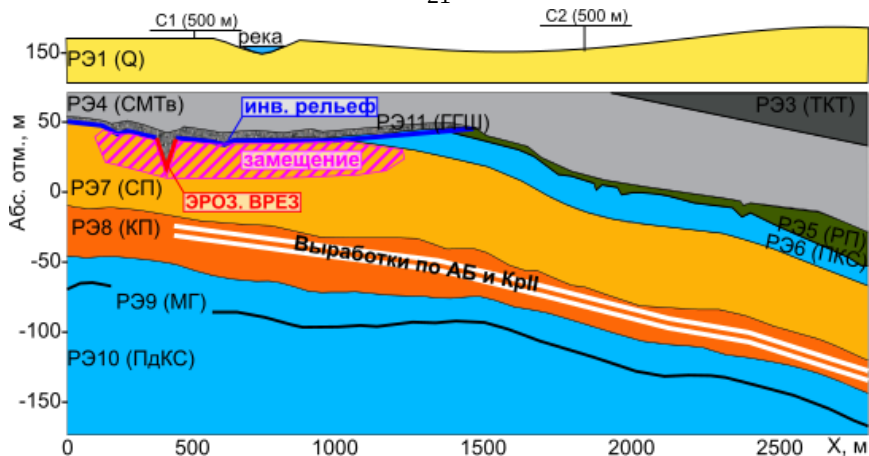


Рисунок 8 – Итоговая инженерно-геологическая модель ПТС с выявленными опасными процессами (по данным автора [36])

Таким образом, разработаны инженерно-геологические модели природно-технических систем соляных месторождений, учитывающие геологическое строение, тектонические и геоморфологические признаки. Значительное повышение детальности и объективности моделей достигается за счет трехстадийной технологии построения и выделения структурных элементов по различиям в упругих свойствах горных пород на основе разработанного метода шахтной сейсморазведки ПВРО.

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.

В ходе анализа условий, сопутствующих ВСД, ЭВ, зонам замещения и инверсионному рельефу, выявлены ряд закономерностей структурных характеристик геологического разреза, коррелируемых с наличием опасных процессов в ВЗТ, ее гидрогеологическими свойствами и устойчивостью ПТС (рисунок 9). К выявленным

закономерностям относятся: наличие гипсово-глинистой шляпы (ГГШ) и поднятия по кровле солей, угол падения крыльев поднятия, мощность ритмопачек (РП) и ПКС, наличие понижения рельефа над соляным поднятием, расстояние от оси поднятия, наличие замещения верхних карналлитовых пластов. С целью формализованного вычисления риска наличия на том или ином участке ВКМС инверсного разреза и эрозионных врезов, выявленные закономерности выражены в виде нормированных признаков наличия опасных процессов соответствующими формулами (таблица 2). Итоговый показатель риска наличия опасных процессов вычисляется по формуле:

$$P = \begin{cases} 1, & P_{\Gamma} = 1 \\ \frac{\sum_{i=1}^N P_i}{N}, & P_{\Gamma} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

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

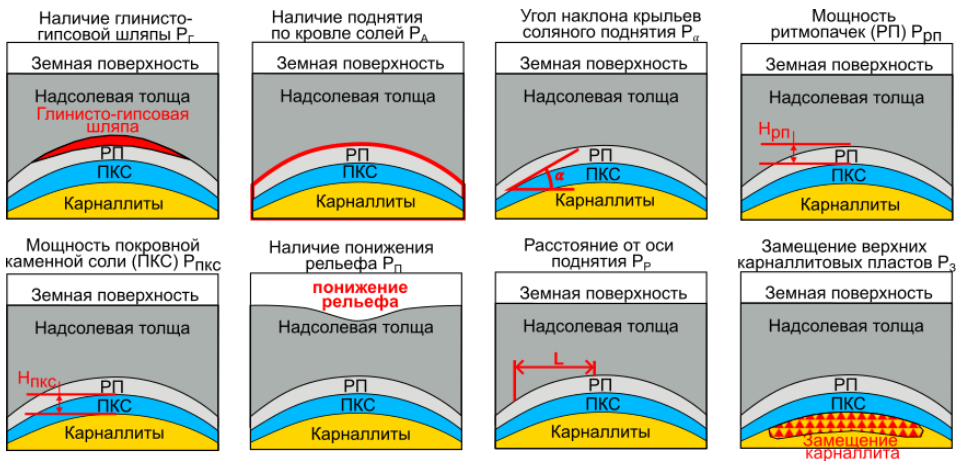


Рисунок 9 – Закономерности структурных характеристик геологического разреза, коррелируемые с вероятностью наличия опасных процессов (по данным автора)

Для районирования ВКМС по риску наличия опасных геологических процессов, проанализирован весь доступный объем поверхностных скважин, пробуренных для разведки ВКМС, которых насчитывается более 1000. В окрестностях каждой из скважин согласно приведенным формулам вычислены соответствующие нормированные признаки, с учетом которых по формуле (3) далее рассчитан итоговый показатель P – риск наличия опасных процессов. Полученные данные позволили выполнить районирование ВКМС по риску наличия ВСД, инверсионного разреза, зон замещения и ЭВ (рисунок 10).

На представленной карте районирования видно, что области с максимальным риском наличия опасных процессов и ухудшенных гидрогеологических свойств ВЗТ 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 дает возможность выделить области, в пределах которых проведение детализационных работ для подтверждения или исключения наличия опасных процессов необходимо в обязательном порядке, а также области, где риск наличия опасных процессов минимален.

Таблица 2 – 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	$P_{\text{З}} = \begin{cases} 1, M_{\text{З}} > 0 \\ 0, M_{\text{З}} = 0 \end{cases}$
Структурный	Наличие поднятия по кровле солей	$P_{\text{А}} = \begin{cases} 1, \text{антиклиналь} \\ 0.5, \text{склон} \\ 0, \text{синклиналь} \end{cases}$
	Угол падения крыльев поднятия	$P_{\alpha} = \frac{\alpha}{\alpha_{\text{макс}}}; \alpha = \tan^{-1} \left(\frac{L_{\text{с}}}{H_{\text{с}}} \right)$
	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	$P_{\text{р}} = 1 - \frac{L}{L_{\text{макс}}}$
	Понижение рельефа	$P_{\text{п}} = \begin{cases} 1, \text{понижение} \\ 0.5, \text{склон} \\ 0, \text{поднятия} \end{cases}$

где M_{Γ} – мощность ГГШ, $L_{\text{с}}$ – длина участка крыла поднятия, $H_{\text{с}}$ – перепад высот участка крыла поднятия, $H_{\text{рп}}$ – мощность ритмопачек, $H_{\text{рп_макс}}$ – максимальная мощность ритмопачек, $H_{\text{пкс}}$ – мощность ПКС, $H_{\text{пкс_макс}}$ – максимальная мощность ПКС, L – расстояние от оси поднятия, $L_{\text{макс}}$ – максимальное расстояние от оси поднятия, $M_{\text{З}}$ – мощность зоны замещения карналлитов.

На основе полученных сведений разработана классификация состояния ПТС (таблица 3), которая позволяет ранжировать участки ведения горных работ по условиям устойчивости ПТС. Разработанная классификация играет важную роль в повышении безопасности строительства и эксплуатации подземных сооружений при подземной разработке соляных месторождений, однако она не обладает всей полнотой возможностей, так как в ней учтены только результаты буровых и горнопроходческих работ. Следующим этапом исследований является расширение разработанной классификации с учетом возможностей геофизических методов и построение карты районирования по наличию опасных процессов.

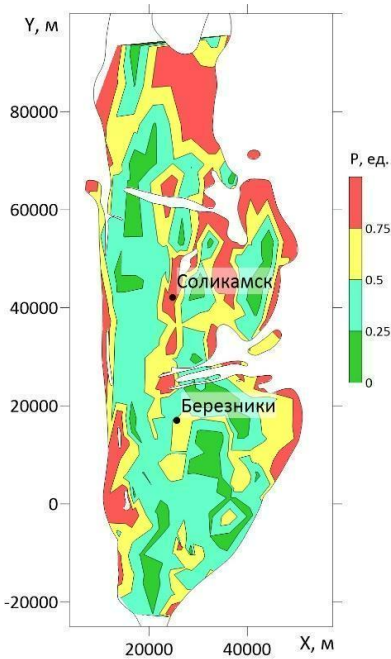


Рисунок 10 – Карта районирования ВКМС по рискам возникновения опасных процессов (по данным автора)

распределения характеристик отражений, связанных с ВСД, ЭВ, инверсионным рельефом и зонами замещения, позволило выявить сейсмические атрибуты, реагирующие на рассматриваемые геологические аномалии. Всего исследовано десять наиболее распространенных сейсмических атрибутов [23], исследования проведены для интервала, в котором залегает горизонт «соляное зеркало» (СЗ) и для интервала переходных пачек (ПП). Для практической реализации процедуры атрибутного анализа создано специальное программное обеспечение, позволяющее выполнить ее без привлечения дополнительного программного обеспечения [42]. Результаты исследований поведения сейсмических атрибутов сведены в таблицу, где знаком «—» обозначены

характеристики, реагирующие на опасные процессы выходом за пределы 2σ снизу, знаком «+» – выходом сверху, пустые ячейки соответствуют нереагирующим атрибутам (таблица 4).

Таблица 3 – 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

С учетом выявленных закономерностей (таблица 4) и критериев устойчивости, разработана классификации состояний изучаемой природно-технической системы (таблица 5). 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.

Таблица 4 – Связь наличия аномалий геологического строения 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	+	+			

Таблица 5 – Оценка физического состояния ПТС с учетом геолого-геофизических признаков

Условия устойчивости ПТС	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

Условия устойчивости ПТС	Состояние природно-технической системы «инженерно-геологический массив – подземное сооружение»		
	1 – устойчивое	2 – неустойчивое	3 – критическое
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 наличию по состоянию ПТС «ИГМ-ПС», согласно которому сформирована соответствующая карта (рисунок 11). Основным уточняющим фактором по отношению к карте районирования ВКМС по признаку наличия опасных геологических процессов (рисунок 10) явились данные шахтной сейсморазведки, проведенной на большинстве из действующих на ВКМС рудников. Эти данные позволили фактически установить, что ухудшение гидрогеологических свойств ВЗТ определяется по наличию ЭВ и инверсионного рельефа по кровле соляных поднятий начиная с признака Р, большего 0.5.

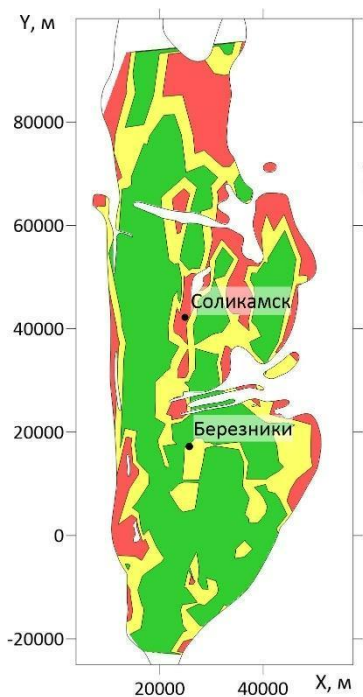


Рисунок 11 – Карта районирования ВКМС по состоянию ПТС «инженерно-геологический массив – подземные сооружения» (по данным автора [36])

отмечаются в центральной части южной половины ВКМС.

Итогом представленных разработок является формализованная методика анализа инженерно-геологического состояния и прогноза гидрогеологических свойств ВЗТ с учетом

риска наличия опасных процессов, а также классификация состояний природно-технической системы по комплексу геолого-геофизических признаков (рисунок 12).

Методика учитывает:

- геотехнические и гидрогеологические 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 12 – Методика анализа инженерно-геологического состояния и прогноза гидрогеологических свойств водозащитной толщи (по данным автора [36])

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 потере устойчивости ПТС. В случае, если наличие опасных процессов маловероятно, решение о проведении геофизических исследований принимается на усмотрение компаний-недропользователей. После получения результатов шахтной

сейсморазведки, вся имеющаяся геологическая, геотехническая и геофизическая информация анализируется и ранжируется согласно разработанной классификации (таблица 5). В случае, если доказано наличие опасных процессов, и состояние ПТС признано неустойчивым или критическим, в проект строительства подземных сооружений вносятся соответствующие коррективы.

Разработанная методика обеспечивает переход к группе сценариев развития состояния природно-технических систем с дистанционным контролем инженерно-геологических условий. Как показывает ее широкое внедрение, она на практике позволяет выполнять анализ инженерно-геологического состояния и прогноза гидрогеологических свойств ВЗТ для повышения безопасности эксплуатации подземных сооружений на основе выявления изменений в структурных характеристиках геологического разреза и распределении литологических свойств горных пород в вертикальной плоскости.

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.

В условиях соляных месторождений возможна ликвидация отдельных частей шахтных полей путем заполнения их рассолами. Размещение рассолов в подземных сооружениях приводит к снижению действующих напряжений и интенсивности смещений породного контура и подработанной толщи. Действующая часть шахтного поля отделяется от заполняемой рассолами с помощью гидроизолирующих целиков (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. При этом, в целях безопасности, гидроизолирующие перемычки делаются абсолютно глухими, в результате чего возможность установки в ликвидируемой части шахтного поля каких-либо контролирующих устройств полностью исключена.

Очевидно, что для обеспечения анализа и прогноза состояния ГЦ, как геотехнических

массивов с заданными свойствами, необходим строгий контроль за геометрическими и инженерно-геологическими характеристиками массивов горных пород между подземными сооружениями. В сложившейся ситуации контроль за строением и состоянием ГЦ возможен на основе детального сейсмического мониторинга, базирующегося на новом методе шахтной сейсморазведки ПВРО. Применимость сейсмического мониторинга для контроля за геометрическими и инженерно-геологическими характеристиками ГЦ обоснована специально проведенным для этого численным и физическим моделированием [20, 37]. Для реализации данной возможности разработана соответствующая методика, основанная на комплексном сейсмическом мониторинге геометрических и инженерно-геологических характеристик массивов горных пород между подземными сооружениями с помощью шахтной сейсморазведки ПВРО в горизонтальной плоскости (рисунок 13).

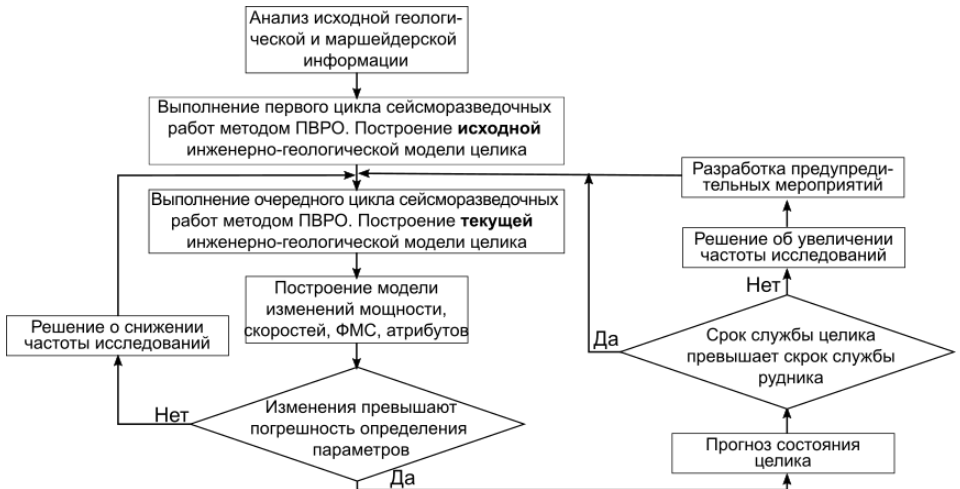


Рисунок 13 – Методика анализа и прогноза состояния гидроизолирующих целиков (по данным автора [36])

На первом этапе мониторинга выполняется анализ исходной геологической и маршейдерской информации, после чего проводится первый цикл шахтной сейсморазведки ПВРО. На основе полученных данных строится исходная геометрическая и инженерно-геологическая модель ГЦ. Далее реализуются очередные циклы шахтных сейсморазведочных работ, по итогам которых выполняется построение текущих моделей ГЦ. Текущие модели сравниваются с исходной, на основании чего формируется модель изменений характеристик ГЦ – ширины, 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 вся система наблюдения развернута на 90^0 – для исследований на поперечных волнах применяются вертикально-ориентированные сейсмоприемники и источник упругих колебаний, а для исследований на продольных волнах используются горизонтально-ориентированные сейсмоприемники и источник упругих колебаний. В обоих случаях наблюдения проводятся с двумя линиями возбуждения для идентификации отражений, приходящих из разных полупространств. По результатам практической апробации адаптированной методики полевых работ выяснено, что на обоих типах волн регистрируются отчетливые отражения от противоположной границы целиков.

Одновременное использование продольных и поперечных волн открывает возможность для расчета физико-механических свойств горного массива, слагающего целик. На основе теории упругости и корреляционных связей, полученных другими исследователями, рассчитываются модули упругости, сдвига, всестороннего сжатия и коэффициент Пуассона (рисунок 14).

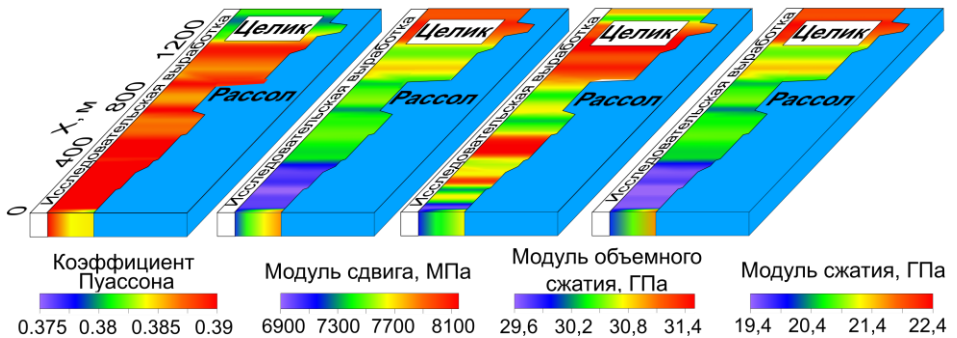


Рисунок 14 – Физико-механическая модель гидроизолирующего целика, полученная на основе пересчета сейсмических атрибутов (по данным автора [36])

Указанные характеристики позволяют перейти через корреляционные связи к районированию ГЦ по значению предела прочности на сжатие (Кашников Ю.А., Лебедева О.О., 2023), а с помощью метода Турнера-Шевякова – по степени нагружения целика (рисунок 15). Совместный анализ указанных характеристик с учетом результатов

атрибутного анализа сейсмических записей, измерения геометрических характеристик ГЦ и сравнения их с предельно допустимыми значениями, представляет собой модель оценки состояния целика (таблица 6). Данная модель дает полноту понимания о строении и состоянии целика на момент выполнения исследований, достаточную для обеспечения устойчивости ПТС и повышения безопасности эксплуатации подземных сооружений.

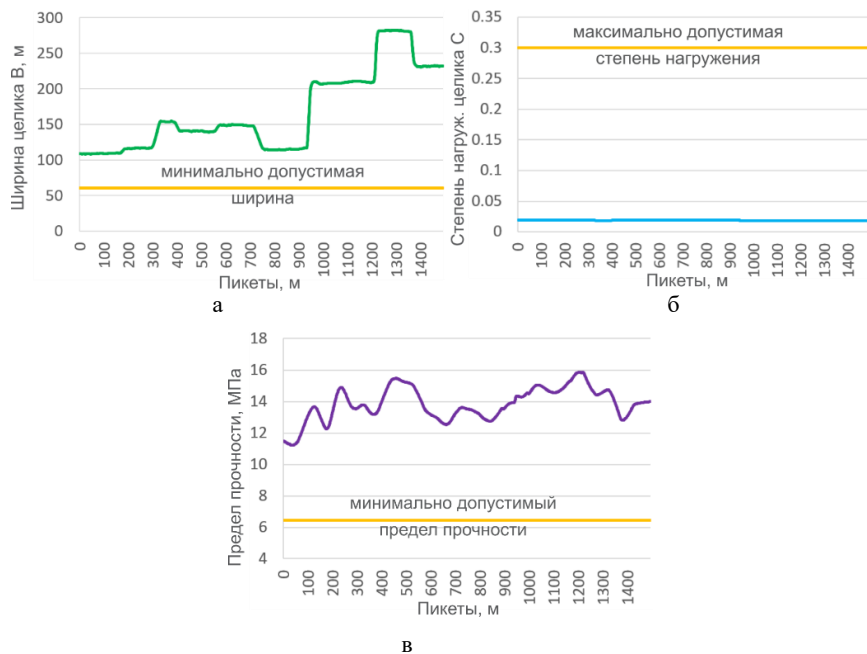


Рисунок 15 – Районирование состояния целика по характеристикам: а – фактическая и минимально допустимая ширина, б – фактическая и максимально допустимая степени нагружения, в – фактический и минимально допустимый предел прочности (по данным автора [36])

Таблица 6 – 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)	$ССА < 1$	ССА локально приближается к 1	ССА обширно приближается к 1

Характеристики состояния ГЦ (для сильвинита)	Состояние целика (сильвиниты)		
	Безопасное	Небезопасное	Критическое
Степень нагружения целика C (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 геометрических и инженерно-геологических характеристик массивов горных пород между подземными сооружениями, в свою очередь, открывает путь к анализу и прогнозу состояния ГЦ и устойчивости всей ПТС в целом. Так, на одном из гидроизолирующих целиков мониторинговые сейсморазведочные работы позволили установить факт заметного уменьшения его мощности, которое достигло на одном из участков девяти метров (рисунок 16, а). Данная цифра превышает погрешность определения геометрических характеристик ГЦ, в связи с чем должна быть принята во внимание и учтена в прогнозе его состояния.

Прогноз состояния выполняется по участку максимальных изменений, в данном случае на пикете 268. Для кривой, описывающей изменение мощности ГЦ на указанном пикете, на основании метода наименьших квадратов выполняется поиск уравнения линейной регрессии. Далее, с использованием найденного уравнения выполняется прогноз изменения предела прочности на сжатие (рисунок 16, б), ширины целика (рисунок 16, в), и степени его нагружения (рисунок 16, г) на необходимый период, в данном случае прогноз сделан до 2050 года. Выполненный прогноз, с учетом информации о предельно допустимых значениях прогнозируемых характеристик, позволяет оценить перспективы дальнейшей эксплуатации ГЦ при сохранении установленных темпов их изменений. В случае, если темпы изменений изменяются, соответственным образом меняются и прогнозные оценки характеристик целика.

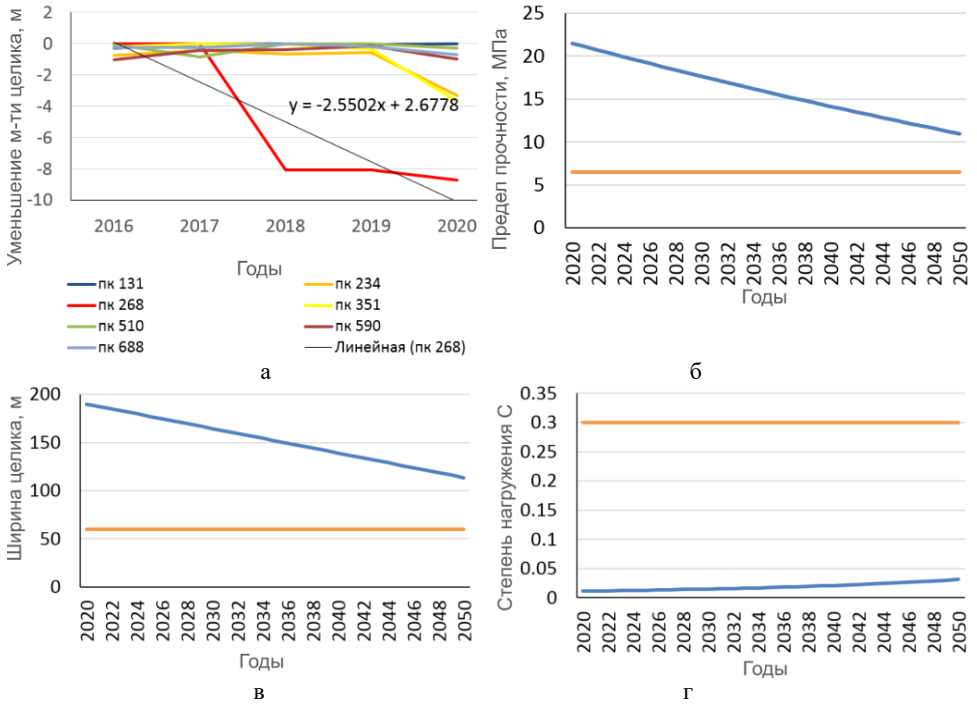


Рисунок 16 – Прогнозная оценка изменений характеристик целика: а – результаты мониторинга целика за период 5 лет, б, в, г – прогнозная оценка характеристик целика на участке наибольших изменений соответственно для предела прочности на сжатие, ширины целика и максимальной степени нагружения (по данным автора [36])

Таким образом, разработана и внедрена методика анализа, мониторинга и прогноза состояния геотехнических массивов с заданными прочностными и деформационными характеристиками, основанная на детальном сейсмическом мониторинге геометрических и инженерно-геологических характеристик массивов горных пород между подземными сооружениями. Методика обеспечивает реализацию группы сценариев развития устойчивости природно-технической системы с дистанционным контролем состояния гидроизолирующих целиков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты исследований.

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.

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 РАБОТ

по теме диссертации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. 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 EUROPE2005. – 2005. – P. 2427–2430
2. 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.
3. Санфиров, И.А. Сейсморазведочные исследования водозащитной толщии 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.
4. 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.
5. 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.
6. Татаркин, А.В. Инженерно-геофизические исследования в неблагоприятных климатических условиях/А.В. Татаркин, А.М. Пригара//Инженерные изыскания. – 2012. – №11. – С. 20-24.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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//ГИАБ. – 2015. – №5. – С. 120–130.
12. 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.

13. Жуков, А.А. Оценка глубины проникновения электромагнитных волн в солях ВКМС/А.А. Жуков, А.М. Пригара, И.Ю. Пушкарева, Р.И. Царев//Геофизика. – 2017. – №5. – С. 25–28.
14. Жуков, А.А. Применение геофизических методов для выявления ослабленных зон в соленотвалах 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.
15. 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». – 2019.
16. Жуков, А.А. Способ шахтной сейсморазведки для изучения особенностей геологического строения ВКМС/А.А. Жуков, А.М. Пригара, Р.И. Царев, И.Ю. Шусткина//ГИАБ. – 2019. – №4. – С. 121–136. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-04-0-121-136>
17. 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.
18. 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. <https://doi.org/10.21285/2541-9455-2019-42-2-176-184>
19. Царев, Р.И. Геологическое обоснование результатов шахтной сейсморазведки на поперечных волнах с разделением отражений ПВРО/ Р.И. Царев, А.В. Глухих, А.А. Жуков, Ю.Н. Морошкина, А.М. Пригара//Материалы международной научно-практической конференции «Инженерная и рудная геофизика 2020». – 2020.
20. Пригара, А.М. Исследование процесса распространения волн при сейсмоакустических воздействиях в породном массиве методами математического моделирования/А.М. Пригара, В.Н. Аптуков, Р.И. Царев, В.А. Ворошилов, А.А. Жуков//Материалы международной научно-практической конференции «Инженерная и рудная геофизика 2020». – 2020.
21. 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». – 2020.
22. 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». – 2021.
23. 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. DOI 10.1088/1755-1315/833/1/012084

24. 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». – 2021.
25. 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. – С. 304–311. DOI 10.1007/978-3-030-80482-8_35
26. 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. <https://doi.org/10.25296/2221-5514-2021-13-4-80-91>
27. Пригара, А.М. Решение задач эксплуатационной разведки и повышения 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. DOI 10.17580/gzh.2021.04.02
28. 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. <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.04.01>
29. 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. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_51_0_82
30. 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. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_2_0_72
31. 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. DOI 10.17580/em.2023.02.04
32. 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. DOI 10.17580/em.2024.02.04
33. 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. DOI 10.17580/gzh.2024.12.06
34. Татаркин, А.В.. Оценка устойчивости и физического состояния гидротехнического сооружения на р. Очер (Пермский край)/А.В. Татаркин, А.М. Пригара, П.А. Красильников, С.Г. Ашихмин//Известия Тульского государственного университета.– 2025. –№1. – С. 666–681.

35. Царев, Р.И. Уточнение представлений о тектонике Верхнекамского месторождения солей по данным сейсморазведки/Р.И. Царев, Грибков Д.С., А.М. Пригара, А.А. Жуков//Вестник ПГУ. Геология. –2026. –№1.
36. 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>

Монографии:

37. Пригара, А.М., Царев, Р.И. и др. Шахтная сейсморазведка на месторождениях солей (на примере ВКМС)/А.М. Пригара, Р.И. Царев, В.А. Ворошилов, А.А. Жуков. – Пермь. – 2024. – 182 с. – ISBN 978-5-6045058-5-4.

Патенты на изобретения:

38. Бабкин, А.И. Способ сейсмического обследования свайных фундаментов/А.И. Бабкин, И.А. Санфиров, А.Г. Ярославцев, А.М. Пригара, К.Б. Фаткин//Патент на изобретение RU 2280267 С1. – 2005.
39. Жуков, А.А. Способ комплексной диагностики состояния бетонной крепи и закрепного пространства шахтных стволов/А.А. Жуков, А.М. Пригара, И. Ю. Пушкарёва, В.В. Тарасов//Патент на изобретение RU 2624799 С1. – 2016.
40. Тарасов, В.В. Способ контроля целостности породных стенок при строительстве шахтных стволов/В.В. Тарасов, О.В. Иванов, В.С. Пестрикова, А.М. Пригара, И.В. Загвоздкин//Патент на изобретение RU 2716760С1. – 2019.
41. Пригара, А.М. Способ шахтной сейсмической разведки/А.М. Пригара, А.А. Жуков, Р.И. Царев, И.Ю. Шусткина, В.А. Ворошилов//Патент на изобретение RU 2709415 С1. – 2019.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

42. Царев, Р.И. Программа атрибутивного анализа AtAn/Р.И. Царев, В.А. Ворошилов, А.М. Пригара, А.А. Жуков, И.Ю. Шусткина//Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2020610568. – 2020.
43. Пригара, А.М. Программа обработки шахтных сейсмических данных FastMineProc/А.М. Пригара, В.А. Ворошилов, А.А. Жуков, И.Ю. Шусткина, Р.И. Царев//Свидетельство о рег. программы для ЭВМ RU 2020610268. – 2020.
44. Ворошилов, В.А. Программа поиска годографов дифрагированных волн GodFind/В.А. Ворошилов, А.М. Пригара, Р.И. Царев, А.А. Жуков, И.Ю. Шусткина//Свидетельство о рег. программы для ЭВМ RU 2020610309. – 2020.
45. Ворошилов, В.А. Программа контроля и документирования полевых сейсморазведочных работ EJ/В.А. Ворошилов, А.М. Пригара, Р.И. Царев, А.А. Жуков, И.Ю. Пушкарёва//Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2020660506. – 2020.
46. Пригара, А.М. Программа решения обратной задачи сейсморазведки для впередизабойного зондирования FS/А.М. Пригара, В.А. Ворошилов, А.А. Жуков, Р.И. Царев//Свидетельство о рег. программы для ЭВМ RU 2022612952. – 2022.
47. Ворошилов, В.А. Программа контроля, документирования и экспресс-обработки данных полевых сейсморазведочных работ EJ. Версия 2.0/В.А. Ворошилов, Р.И.

- Царев, А.М. Пригара, А.А. Жуков, И.Ю. Пушкарёва//Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2022666990. – 2022.
48. Пригара, А.М. Программа для проведения шахтной пространственной миграции в глубинной области MSDM/А.М. Пригара, В.А. Ворошилов, Р.И. Царев, А.А. Жуков//Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2022683171. – 2022.
49. Царев, Р.И. Программа расчета статических поправок StatPopr/Р.И. Царев, В.А. Ворошилов, А.А. Жуков, А.М. Пригара//Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2023614450. – 2023.
50. Пригара, А.М. Программа расчета сдвигов для разделения отражения в способе ПВРО Shifts/А.М. Пригара, В.А. Ворошилов, А.А. Жуков, Р.И. Царев//Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2023614650. – 2023.
51. Пригара, А.М. Программа решения прямой задачи сейсморазведки для впередизабойного зондирования FS/В.А. Ворошилов А.М. Пригара//Свидетельство о рег. программы для ЭВМ RU 2022612956. – 2022.
52. Ворошилов, В.А. Программа создания протоколов для 2D и 3D электротомографии ERTProto/В. А. Ворошилов, А. А. Жуков, Р. И. Царев, А. М. Пригара// Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2024660547. – 2024.
53. Царев, Р.И. Программа привязки данных сейсморазведки/Р.И. Царев, В.А. Ворошилов, А.А. Жуков, А.М. Пригара//Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2024684447. – 2024.