На правах рукописи

ЦАРЕВ Роман Ильич

МЕТОДОЛОГИЯ МАЛОГЛУБИННОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ

Специальность 25.00.10
Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования **«Пермский государственный национальный исследовательский университет»** (ФГАОУ ВО ПГНИУ)

Научный руководитель:	доктор технических наук, профессор **Костицын Владимир Ильич**
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, доцент **Путилов Иван Сергеевич**
	доктор геолого-минералогических наук **Ольнева Татьяна Владимировна**
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки **Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича** Уральского отделения Российской академии наук (ФГБУН ИГФ УрО РАН)

Защита диссертации состоится «12» мая 2022 года в 13 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 999.234.02 при Российском государственном геологоразведочном университете имени Серго Орджоникидзе по адресу: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23, зал диссертационного совета (каб. 5-17).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе по адресу: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23 и на сайте: https://mgri.ru/science/scientific-and-innovative-activity/dissertation-council/diss-999-234-02/.

Автореферат диссертации разослан « » апреля 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
канд. геол.-минерал. наук Иванов А.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований. На этапе эксплуатационной разведки на Верхнекамском месторождении солей (ВКМС) проводится бурение солеразведочных скважин по сети 1×1 км и 2×2 км, с целью определения геологического строения. Вокруг ствола пройденной скважины оставляют целики, в пределах которых горные работы не ведутся. Диаметр этих целиков составляет от 150 до 250 м. Столь редкая сеть разведочных скважин приводит к тому, что многие особенности геологического строения промышленных пластов и водозащитной толщи (ВЗТ) остаются невыявленными. К таким особенностям относятся дизъюнктивные и пликативные тектонические дислокации (нарушения) соляной толщи, присутствие которых негативно сказывается на безопасности при эксплуатации калийных рудников и приводит к потере запасов полезных ископаемых. Детализация геологического строения в межскважинном пространстве остается за геофизическими методами, в частности, на проектируемых к отработке площадях шахтных полей предусматривается проведение опережающих поверхностных сейсморазведочных работ.

Условия для проведения сейсморазведки на ВКМС далеки от идеальных. Сильное затухание высокочастотной составляющей сигнала в верхней части разреза (ВЧР) осложняет получение кондиционных материалов, особенно для интервала продуктивного пласта, залегающего на относительно небольшой глубине. Это связано с наличием неконсолидированной толщи грунтов в ВЧР, зоны малых скоростей (ЗМС) и малоконтрастным, с точки зрения отражающей способности, строением галогенной формации. Перечисленные негативные факторы характерны и для других месторождений калийных солей и в целом для месторождений твердых полезных ископаемых.

В настоящее время на ВКМС сейсморазведка проводится с применением импульсного порохового и механического источников упругих колебаний при технически устаревшем подходе к обработке и интерпретации данных. Для повышения качества материалов малоглубинной сейсморазведки и объективности результатов необходимо совершенствование применяемой технологии на всех этапах, начиная с технологии полевых работ, заканчивая обработкой и интерпретацией.

Степень разработанности. Сейсморазведкой занимались многие специалисты и ученые на просторах великой Родины и за рубежом, полный перечень рассмотрен в тексте диссертации. На ВКМС развитие сейсморазведки связано с именами специалистов: Бабкин А.И., Вишняков Э.Х., Глебов С.В., Герасимова И.Ю., Жуков А.А., Маловичко А.А., Меньшиков Ю.П., Митюнина И.Ю., Пригара А.М., Санфиров И.А., Семерикова И.И., Ярославцев А.Г. и многих других. Основные выводы ранее проведенных исследований были учтены при работе над диссертацией.

Цели и задачи. Целью диссертационной работы является теоретическое и экспериментальное обоснование применения взрывного источника упругих колебаний при проведении малоглубинной сейсморазведки и установление закономерностей между присутствием в разрезе тектонических нарушений различных типов и изменением значений атрибутов сейсмической записи на основе полноволнового конечно-разностного численного моделирования.

Объектом исследований является соляная толща ВКМС, одного из крупнейших месторождений калийно-магниевых солей в мире. Месторождение расположено в Российской Федерации, Пермском Крае, г. Березники и г. Соликамск. Для диссертации использованы материалы, полученные автором в результате исследовательских работ, проведённых собственными силами попутно с основной рабочей и учебной деятельностью.

Основные задачи, решаемые в рамках диссертации:

1. Провести опытные полевые сейсморазведочные работы с применением импульсного порохового и взрывного источников упругих колебаний, сравнить и проанализировать данные. Провести апробацию применяемого впервые на ВКМС взрывного источника с использованием телеметрических многокомпонентных систем регистрации, проанализировать полученные материалы. Провести обоснование оптимальных параметров системы наблюдений и источника упругих колебаний для поисков и разведки месторождений калийных солей.

2. Провести анализ влияния процедур обработки сейсморазведочных данных, на итоговый результат – временной разрез. Откорректировать граф обработки малоглубинной сейсморазведки для последующей кинематической, динамической и геологической интерпретации. Провести обоснование применения данных геофизических исследований скважин (ГИС) в процессе обработки и интерпретации сейсморазведочных данных при малоглубинных сейсморазведочных исследованиях.

3. Провести обоснование применения сейсмического моделирования в процессе проведения сейсморазведки на ВКМС, проанализировать и выбрать оптимальные параметры при построении сейсмогеологической модели и расчете волнового уравнения. Построить тонкослоистые модели геологической среды месторождения на основе акустического каротажа (АК) с добавлением в целевой интервал тектонических нарушений, описанных геологами ВКМС.

4. Определить закономерности между изменением параметров регистрируемого сигнала и присутствием в разрезе различных тектонических дислокаций. На основе выявленных закономерностей обосновать применение атрибутного анализа (АА) при обнаружении тектонических дислокаций в галогенной формации на ВКМС. Разработать алгоритм и программное обеспечение, позволяющее оперативно обрабатывать, визуализировать и проводить регрессионный анализ атрибутов.

5. Провести апробацию предлагаемых подходов, технологий и методик при проведении опытно-методических испытаний в реальных условиях на ВКМС. При достижении положительного результата рекомендовать предлагаемые технологии и методики для внедрения в процесс малоглубинных сейсморазведочных работ при поисках и разведке месторождений калийных солей.

Научная новизна:

1. Предложено применение взрывного источника упругих колебаний при малоглубинных сейсморазведочных исследованиях на ВКМС с использованием телеметрических многокомпонентных систем регистрации и современного программного обеспечения. Для стабильной регистрации основных отражений в целевом интервале соляной толщи на глубинах от 100 до 800 м предлагается

использовать при возбуждении заряды взрывчатого вещества (ВВ) весом от 50 до 1000 г, погруженных на забой скважин глубиной от 1,5 до 30 м.

2. Предложена система наблюдений для изучения соляной толщи с шагом между пунктами приема (ППр) от 2 до 5 м, шагом пунктов возбуждения (ПВ) от 4 до 10 м, позволяющая повысить плотность наблюдений (кратность) в целевом интервале разреза при соблюдении технико-экономической рентабельности. При регистрации предлагается использовать телеметрические системы с одиночными датчиками высокой чувствительности.

3. Предложена тонкослоистая сейсмогеологической модель ВКМС построенная по данным АК с добавлением пликативных и дизъюнктивных тектонических нарушений различных размеров, позволяющая при решении прямой задачи, учесть особенности распространения волны, максимально приближенные к реальным условиям. Ранее на ВКМС применялась эффективная сейсмическая модель, отражающая геологический разрез в виде нескольких пластов большой мощности при решении волнового уравнения методом лучевого трассирования для оптического приближения волновых процессов.

4. Разработана методика динамической интерпретации на основе АА синтетических данных, которая позволяет выделить основные типы тектонических дислокаций. Разработан и внедрен алгоритм преобразования и визуализации результатов АА. В рамках алгоритма, производится регрессионный анализ между значениями атрибутов волновой картины синтетических данных и исходных моделей с присутствием известных тектонических нарушений. Предложенный алгоритм позволяет выделить набор атрибутов, реагирующих на конкретные дислокации известного размера. Разработано программное обеспечение AtAn, реализующее алгоритм предлагаемой методики динамической интерпретации, получено свидетельство о регистрации программы.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Сейсморазведочные работы методом отраженных волн (МОВ) по методике общей глубинной точки (МОГТ) на ВКМС занимают лидирующие позиции по объемам производимых геофизических исследований как в поверхностном, так и в шахтном исполнении. Фронт продвижения подземных горных работ на месторождении направлен в сторону краевых частей калийной залежи. Эти районы характеризуются более сложной структурой соляной толщи, соответственно, и сложными горно-геологическими условиями. Поэтому вопрос совершенствования существующих методов изучения ВЗТ и обнаружения тектонических нарушений стоит остро.

Практическая и теоретическая значимость результатов исследований автора заключается в следующем:

1. Предлагаемая система наблюдений с использованием взрывного источника упругих колебаний при проведении малоглубинной сейсморазведки на ВКМС дает прирост в качестве регистрируемых данных (соотношении сигнал/шум), тем самым значительно увеличивает надежность всех последующих этапов сейсморазведки и, как следствие – результатов геологической интерпретации и динамической интерпретации;

2. Разработанная тонкослоистая модель ВКМС и полноволновое сейсмическое моделирование на ее основе позволяет изучить особенности

распространения сейсмических волн в условиях близких к естественному залеганию пород. Адекватная геологическому строению тонкослоистая сейсмогеологическая модель изучаемой среды и понимание процесса распространения упругих волн создает основу для корректной обработки и интерпретации геофизических материалов, ключ для решения обратной задачи;

3. Предлагаемая методика динамической интерпретации позволяет на новом технологическом уровне получить дополнительную информацию о геологическом строении участка исследований и объективно выделить местоположение тектонических нарушений (при их наличии в разрезе).

В диссертации даны рекомендации по усовершенствованию технологии малоглубинной сейсморазведки МОВ МОГТ, применяемой при поисково разведочных работах на месторождениях калийных солей. Проведено теоретическое и экспериментальное обоснование предлагаемых методик. Предложенные технологии и методики могут быть адаптированы на других месторождений твердых полезных ископаемых по причине схожести сейсмогеологических условий проведения работ.

Методология и методы исследований. В рамках диссертации применялась следующая методология: анализ априорного геологического строения месторождения и тектоники, получение исходного сейсмического материала высокого качества при проведении полевых работ с использованием взрывного источника упругих колебаний, совершенствование технологии производства полевых сейсморазведочных работ и процесса обработки, адаптированной к условиям малоглубинных работ для поисков и разведки калийных солей, построение тонкослоистых сейсмогеологических моделей на основе данных акустического каротажа с включением в них различных тектонических нарушений, решение прямой задачи сейсморазведки, разработка методики поисков и выделения тектонических дислокаций на основе атрибутного анализа, разработка программного обеспечения, позволяющего реализовать разработанный алгоритм поисков, апробация методики поисков тектонических нарушений.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработана технология полевых сейсморазведочных работ, основанная на использовании взрывного источника упругих колебаний при изучении малых глубин, позволяет получить сейсмический материал высокого качества, удовлетворяющий требованиям для проведения кинематической, динамической и геологической интерпретации.

2. Построенная по данным акустического каротажа тонкослоистая геолого-геофизическая модель среды, позволяет по результатам сейсмического моделирования оценить применимость сейсморазведки к разным геологическим условиям, учесть эффекты интерференции элементарных и многократных отражений, затухание, влияние поверхностных волн, дисперсию и конверсию типов волн и установить перспективность метода для выделения тектонических нарушений.

3. Разработана технология обработки, основанная на совместном использовании данных сейсморазведки с данными акустического каротажа, детальном учете поверхностных условий и верхней части разреза, минимальном использовании процедур пространственно-временной фильтрации, позволяет

сохранить все особенности сейсмического материала для проведения интерпретации.

4. Разработана методика динамической интерпретации данных малоглубинной сейсморазведки, основанная на регрессионном анализе сейсмических атрибутов, позволяет изучать особенности геологического строения соляной толщи и выделять тектонические нарушения.

Степень достоверности и апробация результатов. Диссертация отражает результаты научных исследований, выполненных в период учебной и трудовой деятельности автора с 2010 по 2022 года в организациях ФГАОУ ВО «ПГНИУ», ООО «ППИ-Геофизика» и АО «ВНИИ Галургии». Разработанные методики и технологии, описанные в диссертации, внедрены в процесс разведочных работ на Верхнекамском месторождении солей.

Автором написано и опубликовано 24 статьи, из них 10 в рецензируемых изданиях ВАК и 11 индексируемых в Scopus и Web of Science. Результаты исследований докладывались на 9 конференциях: Международная научно практическая конференция «Теория и практика разведочной и промысловой геофизики», ПГНИУ, г. Пермь, 2014 г; Международная научно практическая конференция «Инженерная и рудная геофизика 2019», г. Геленджик, 2019 г; Научно практическая конференция «Инженерная сейсморазведка и сейсмология», г. Москва, 2019 г; Международная научно практической конференция, приуроченная к 90-летию со дня основания института «Уралмеханобр», г. Екатеринбург, 2019 г; Международная научно практическая конференция «Инженерная и рудная геофизика 2020», г. Пермь, 2020 г; Международная научно-практическая конференция «РУДНИК», Выставка-форум «Нефть и газ. Химия 2020 г.», 2020 г; Международная геолого геофизическая конференция «ГеоЕвразия 2021. Геологоразведка в современных реалиях», 2021 г; Международная научно-практическая конференция «Инженерная и рудная геофизика 2021», г. Геленджик, 2021 г; Международный научный симпозиум «Неделя Горняка - 2022», г. Москва, 2022 г.

В рамках работы над диссертацией разработано программное обеспечение AtAn, позволяющее проводить динамическую интерпретацию на основе анализа атрибутов волнового поля.

Автор принял непосредственное участие в разработке «Способа шахтной сейсморазведки на поперечных волнах с разделением отражений» (ПВРО), позволяющего получать структурные построения недостижимой ранее детальности при высокой оперативности.

Совместно со специалистами НИЛ Геофизики АО «ВНИИ Галургии», разработано программное обеспечение: GodFind –программа поиска когерентности годографов дифрагированных волн на временных разрезах; FastMineProc – программа расчета геометрии системы наблюдения и экспресс-обработки данных шахтной сейсморазведки; EJ – программа ведения электронного полевого журнала, документирования и расчета геометрии системы наблюдений.

Благодарность от автора. Автор выражает благодарность научному руководителю профессору Костицыну Владимиру Ильичу и научному консультанту профессору Спасскому Борису Алексеевичу за поддержку на протяжении всей учебной и научной деятельности, ценные методические рекомендации. Особую

благодарность автор выражает Пригаре Андрею Михайловичу за наставничество и полезные дискуссии по теме работы, Кудряшову Алексею Ивановичу за продуктивное научное сотрудничество и ценные советы, Жукову Александру Анатольевичу за содействие и помощь на разных этапах проведения исследований.

Автор выражает благодарность за поддержку и помощь в работе над диссертацией творческому коллективу АО «ВНИИ Галургии» Ворошилову В.А., Пушкаревой И.Ю., Глухих А.В. и Тарасову В.В. Высочайший профессиональный уровень специалистов и доброжелательная атмосфера в коллективе, творческий настрой и неподдельный научный интерес способствовали плодотворной работе над диссертацией.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, основной части с шестью главами и заключения. Работа изложена на 186 страницах, включая 105 иллюстраций, 2 таблицы, список сокращений и условных обозначений, список литературных источников из 42 наименований и 1 приложение. Содержание автореферата изложено по защищаемым положениям.

Первое защищаемое положение. *Разработана технология полевых сейсморазведочных работ, основанная на использовании взрывного источника упругих колебаний при изучении малых глубин, позволяет получить сейсмический материал высокого качества, удовлетворяющий требованиям для проведения кинематической, динамической и геологической интерпретации.*

Проведение сейсморазведочных работ на месторождениях твердых полезных ископаемых и, в частности, на ВКМС зачастую связано с рядом неблагоприятных факторов. Это особенности поверхностных условий, строение ВЧР, малая глубина залегания продуктивных пластов и низкая контрастность акустических свойств в целевом интервале. В каждой отдельной области на месторождении и даже в пределах участков работ условия могут быть как благоприятными, так и наоборот. Значительные и частые изменения поверхностных условий и строения ВЧР негативно влияют на регистрируемый сигнал, особенно, если применяемые параметры группирования сейсмоприемников являются одинаковыми и не подбираются индивидуально для исследуемого участка. Для каждого района с выдержанным рельефом необходимо проведение опытных работ по выбору параметров группы (размеров, ориентации и шага). Автором предлагается использовать одиночные сейсмоприемники высокой чувствительности с уменьшением шага ППр до 2–5 м, в зависимости от технико-экономических условий проведения сейсморазведочных работ.

Анализ сейсмограмм (Рисунок 1) показывает, что частотный диапазон импульсного порохового источника, применяемого на ВКМС в настоящее время – приемлем, однако для регистрации целевых отражений его энергии хватает только при крайне благоприятных поверхностных условиях и строении ВЧР.

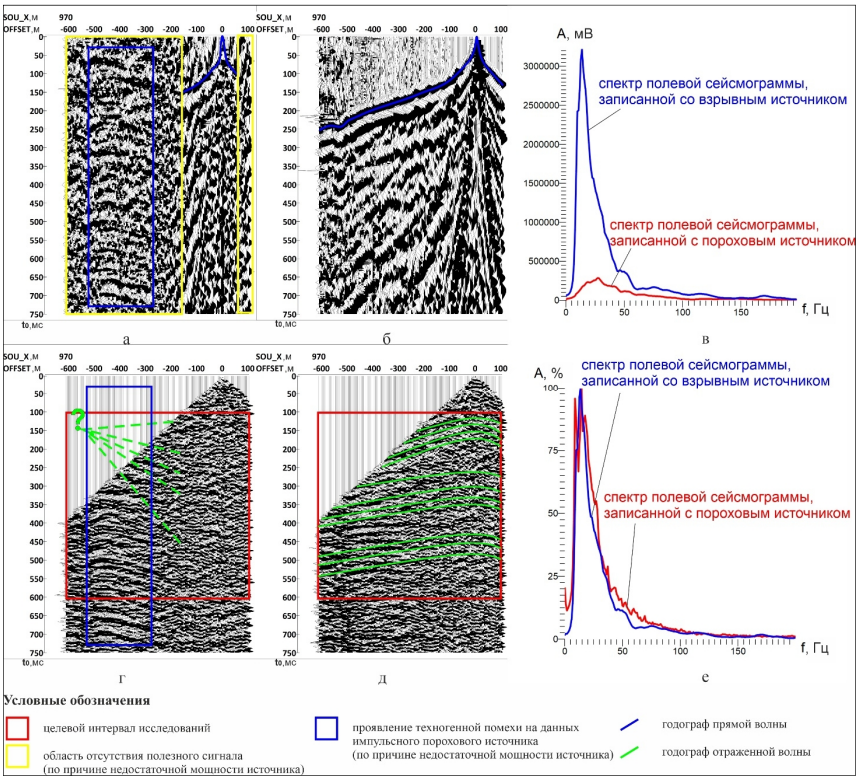

Рисунок 1 – Сравнение сейсмограмм (а, г – сейсмограммы до и после предварительной обработки, записанные с импульсным источником, б, д – сейсмограммы до и после обработки, записанные со взрывным источником, в – амплитудно-частотные спектры в абс. шкале, е – в относительной)

Предлагается использовать взрывной источник упругих колебаний при проведении малоглубинной сейсморазведки на ВКМС с зарядами весом от 50 до 1000 г (выбирается опытным путем на каждом новом участке). Результаты опытных исследований указывают на значительный прирост амплитуды отражений от основных акустически жестких границ (кровли и подошвы соляной толщи, пласта маркирующих глин). Соотношение сигнал/шум у взрывного источника в разы выше чем у импульсного порохового, что положительно влияет на точность скоростного анализа, и, как следствие, на точность глубинной привязки, что позволяет значительно повысить объективность результатов интерпретации. При погружении зарядов на бóльшую глубину и при нахождении источника в низинах (оврагах, долинах рек и ручьев) качество регистрируемого материала возрастает значительно (Рисунок 2).

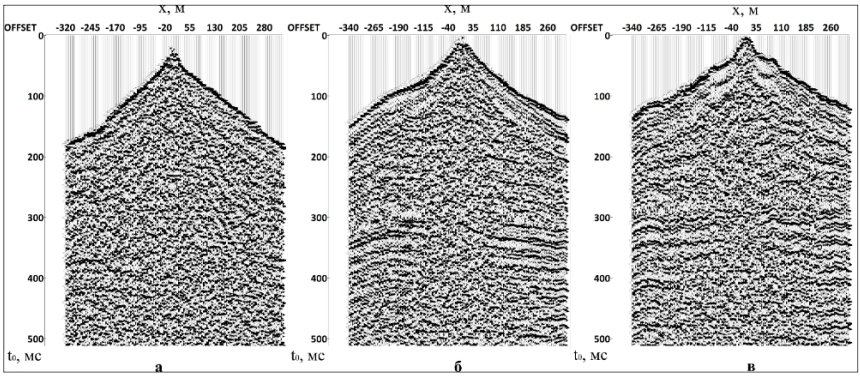

Рисунок 2 – Сейсмограммы, записанные при расположении ПВ в различных местах одного профиля (а – возвышенность, б – низина, в – долина реки)

Четвертичная система на ВКМС представлена комплексом осадочных пород различного генезиса (пески, супеси, суглинки, глины) переменной мощности, находящихся в различных соотношениях. Средняя мощность Q на ВКМС по данным выборки из 911 скважин колеблется от 5 до 15 м, повышенная от 15 до 40 м, аномально высокая – свыше 40 м. Скорость продольной волны в четвертичных отложениях составляет от 300 до 1500 м/с. В этом интервале возникают высокоамплитудные низкочастотные поверхностные волны, интерферирующие с целевыми отражениями. В зависимости от мощности и строения четвертичных отложений заряд взрывчатого вещества предлагается погружать в плотные породы на забой скважины, глубиной от 1,5 до 30 м (выбирается опытным путем на каждом новом участке). Бурение глубоких скважин с частым шагом экономически нецелесообразно, поэтому, для сохранения кратности наблюдений предлагается увеличить число активных каналов и уменьшить шаг между ППр. Установлено, что увеличение глубины скважины в интервале до выхода из ЗМС слабо влияет на подавление поверхностных волн, но значительно сказывается на энергии, передаваемой в массив.

При ухудшении поверхностных условий (Рисунок 3) отражения по данным импульсного порохового источника полностью пропадают. По результатам же взрывного источника целевые отражения прослеживаются на всю длину исследуемого профиля. В интервале продуктивной толщи отсутствуют контрастные оси синфазности, что связано с тонкослоистым, малоконтрастным строением (переслаиванием сильвинитов и каменной соли). Важную роль в работе с сейсморазведочными данными играет тщательный учет ВЧР. Для этого требуется высокоточная топографо-геодезическая съемка высотных отметок и координат ПВ, ППр, а также надежная регистрация первых вступлений по всей длине расстановки.

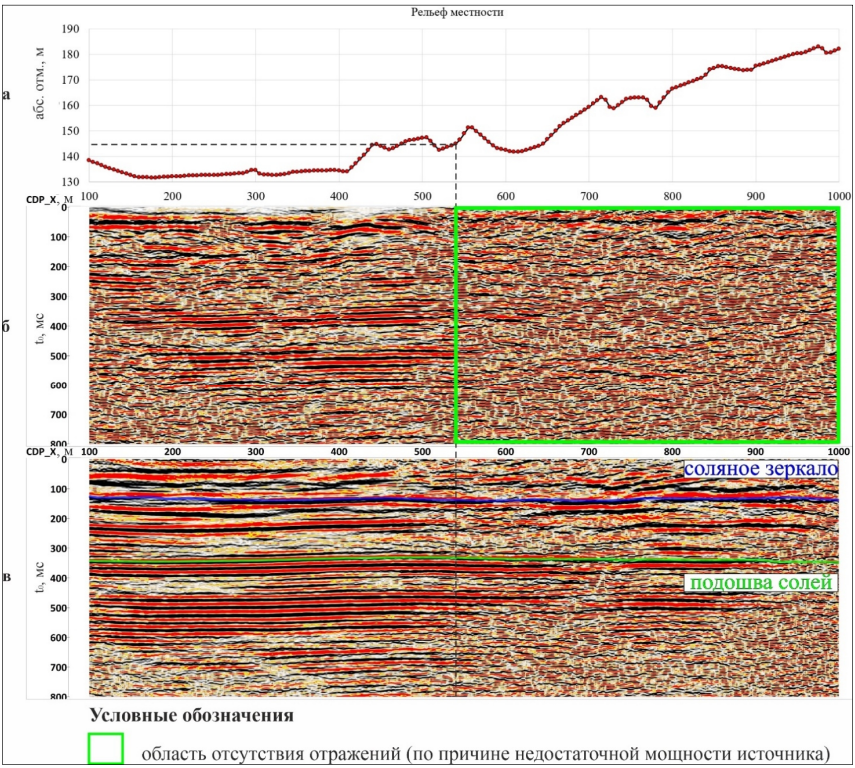

Рисунок 3 – Сравнение временных разрезов (а – рельеф, б – разрез с импульсным пороховым источником, в – со взрывным источником)

Второе защищаемое положение. *Построенная по данным акустического каротажа тонкослоистая геолого-геофизическая модель среды, позволяет по результатам сейсмического моделирования оценить применимость сейсморазведки к разным геологическим условиям, учесть эффекты интерференции элементарных и многократных отражений, затухание, влияние поверхностных волн, дисперсию и конверсию типов волн и установить перспективность метода для выделения тектонических нарушений.*

В реальных тонкослоистых средах, к которым относится осадочная толща ВКМС, при недостаточной вертикальной разрешающей способности сейсморазведки не всегда удается разделить на записях соседние отражения. На сейсмических разрезах целевые отражающие горизонты формируются в результате интерференции элементарных колебаний, амплитуды которых зависят от параметров пачек тонких слоев. В таких пачках участки сложного строения чередуются с интервалами относительно выдержанного горизонтально-слоистого залегания. Для более детального анализа получаемого волнового поля (анализ присутствия контрастных отражающих границ и геологических неоднородностей, влияние волн-помех) предлагается внедрение технологии сейсмического

моделирования на всех этапах выполнения сейсморазведочных работ, с использованием тонкослоистых сейсмогеологических моделей, построенных по данным АК.

Установлено, что тонкослоистая модель, построенная по данным АК со слоями мощностью 1 м является наиболее точным приближением к реальной геологической среде (Рисунок 4). Шаг оптимален как с точки зрения детальности, так и с точки зрения времени расчетов. Предлагаемая модель ВКМС позволяет учесть все значимые физические явления, происходящие с упругой волной в геологической среде. Такой подход обеспечивает максимальное соответствие фактического (регистрируемого) и теоретического (рассчитанного) волновых полей, и, как следствие, максимальную объективность получаемых результатов.

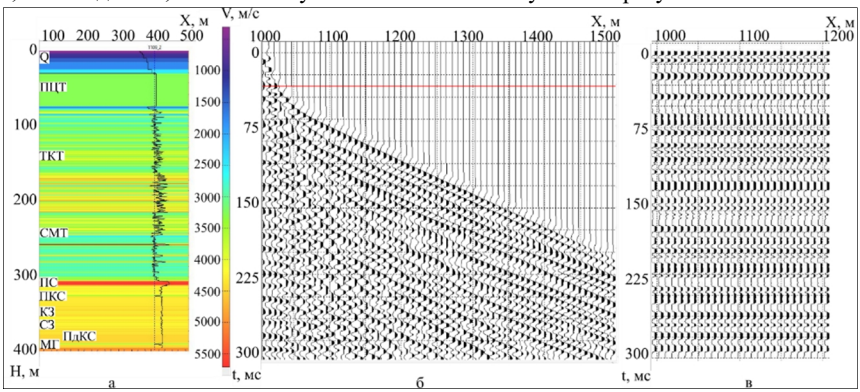

Рисунок 4 – Результаты моделирования (а – горизонтально-слоистая сейсмогеологическая модель, б – синтетическая сейсмограмма, в – участок синтетического временного разреза)

Сейсмическое моделирование проведено в два этапа. На первом прямая задача решалась с использованием поверхностного источника, имитирующего распространение плоской волны в среде, что позволяет дать экспресс-оценку огромного массива получаемых синтетических данных. На первом этапе построено и рассчитано 74 тонкослоистых модели с различными дизъюнктивными и пликативными тектоническими нарушениями, характерными для ВКМС различных размеров (Рисунок 5), а именно: зоны замещения, зоны складчатости, зоны трещиноватости, зоны дробления, разрывные нарушения, флексуры, одиночные антиклинальные и синклинальные складки.

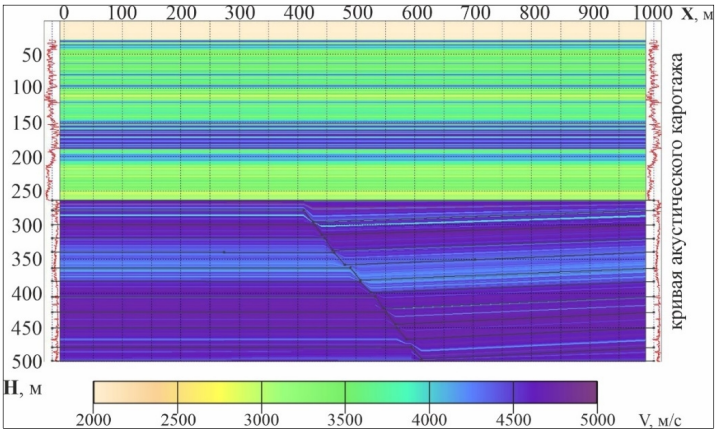

Рисунок 5 – Сейсмогеологическая модель с разрывным нарушением

Полученный результат позволил определить возможности сейсморазведки в условиях, приближенных к реальному залеганию соляной толщи. На синтетических разрезах контрастно выделяются отражающие границы от кровли и подошвы соляной толщи, пласт МГ и кровля карналлитовой пачки (кКП). На синтетических разрезах проявляются изменения, связанные с присутствием неоднородностей.

На втором этапе моделирование проведено с точечным источником сферической волны для моделей среды с нарушениями, выбранными по результатам расчетов, проведенных на первом этапе. Моделирование с использованием сферического источника позволило получить отдельные синтетические сейсмограммы общего пункта возбуждения (ОПВ). На втором этапе построено 7 более детальных моделей складчатой зоны ВКМС бóльших горизонтальных и вертикальных размеров (Рисунок 6).

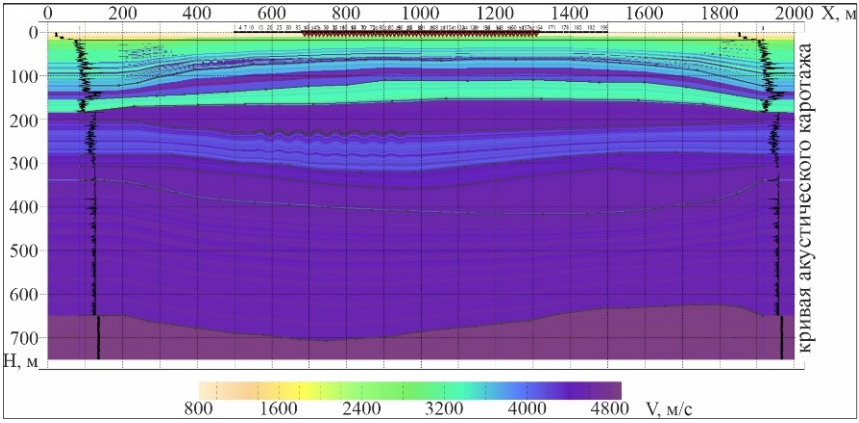

Рисунок 6 – Тонкослоистая модель, зона складчатости в карналлитовой пачке (длина отдельных складок 50 м, высота 10 м)

Сейсмогеологические модели максимально приближены к реальному разрезу, установить который удалось по результатам шахтных сейсморазведочных работ способом ПВРО.

Третье защищаемое положение. *Разработана технология обработки, основанная на совместном использовании данных сейсморазведки с данными акустического каротажа, детальном учете поверхностных условий и верхней части разреза, минимальном использовании процедур пространственно-временной фильтрации, позволяет сохранить все особенности сейсмического материала для проведения интерпретации.*

В условиях малоконтрастной соляной толщи необходимо внимательно относиться к выбору процедур обработки. С целью выделения и подчеркивания полезного сигнала на фоне интерференционной картины исходные полевые сейсмограммы, полученные с помощью взрывного источника упругих колебаний необходимо обработать так, чтобы сохранить полезный сигнал, сведя к минимуму его искажения сильными процедурами обработки, при этом придерживаясь классических подходов, описанных в книгах Л. Хаттона и О. Илмаза. В процессе исследований выявлены процедуры, влияющие на получаемый результат как положительно, так и отрицательно. Предлагаемая технология обработки, позволяет корректно выделить полезный сигнал на фоне волн-помех. Многократное использование процедур пространственно-временной фильтрации (когерентной) полностью исключается по причине сильного искажающего эффекта. Например, с помощью стандартного набора процедур и многократного применения когерентной фильтрации можно получить протяженные оси синфазности из чистого шума, т.е. разрез, никак не связанный с реальной геологией. Основной критерий корректной обработки можно сформулировать следующим образом: если на исходных сейсмограммах с полосовой фильтрацией и амплитудной коррекцией присутствуют годографы отраженных волн, их стоит ожидать и на итоговом временном разрезе.

Предлагаемая технология обработки для условий поисков и разведки калийно-магниевых солей можно условно разделить на этапы: предобработка, окончательная обработка и обработка разреза. Предварительная обработка сейсмограмм включает процедуры редакции и восстановления полярности инвертированных трасс, бинирования, регулировки амплитуд, фильтрации помех, мьютинга. Окончательная обработка сейсмограмм включает в себя ввод статических поправок, фильтрацию помех, анализ скоростей, ввод кинематических поправок, коррекцию статических поправок, уточнение скоростного закона, суммирование, привязку к результатам сейсмического моделирования. Обработка временного разреза включает фильтрацию, перевод из временной шкалы в глубинную, прослеживание отражающих горизонтов, коррекцию кинематики, привязку к результатам сейсмического моделирования. Разрез до и после применения предлагаемого графа обработки представлен на рисунке 7.

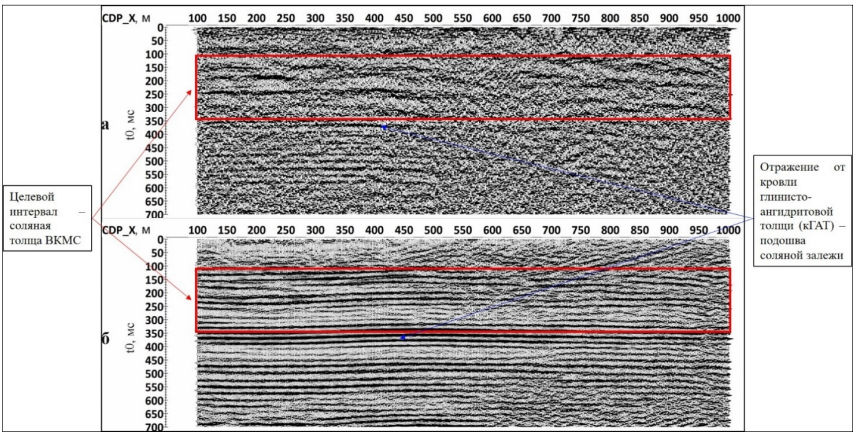

Рисунок 7 – Временной разрез по профилю (а – после предобработки, б – после основного этапа обработки)

Для расчета статических поправок предлагается использовать метод сейсмотомографии с привлечением данных о геологическом строении ВЧР, высокоточной топографо-геодезической съемки, материалов ГИС и сейсмического моделирования. Проследить отражения внутри соляной толщи по всей длине исследуемых профилей получается не всегда и особенно сложно выделить неоднородности, связанные с внутрисоляными деформациями, что связано с малой акустической контрастностью в целевом интервале.

Для корректной привязки отражающих горизонтов к геологическим границам предлагается проведение сейсмического моделирования на основе имеющихся геологических и геофизических данных, что позволит определить реальное положение целевых отражающих горизонтов на временных разрезах. В качестве инструмента для решения прямой задачи сейсморазведки необходимо использовать конечно-разностное численное моделирование. Процесс привязки состоит из нескольких этапов, основные из которых представлены на рисунке 8. Исходные данные акустического каротажа (Рисунок 8а, 8б), преобразованные в интервальные времена пробега продольной волны и осредненные значения плотности пластов пересчитываются в коэффициенты отражения для каждого интервала, которые, в результате свертки с импульсом заданной формы преобразуются в трассу однократных отражений (ТОО) (Рисунок 8, в). ТОО и синтетический временной разрез увязываются между собой (Рисунок 8, г) и сопоставляются с участком реального временного разреза (Рисунок 8, д).

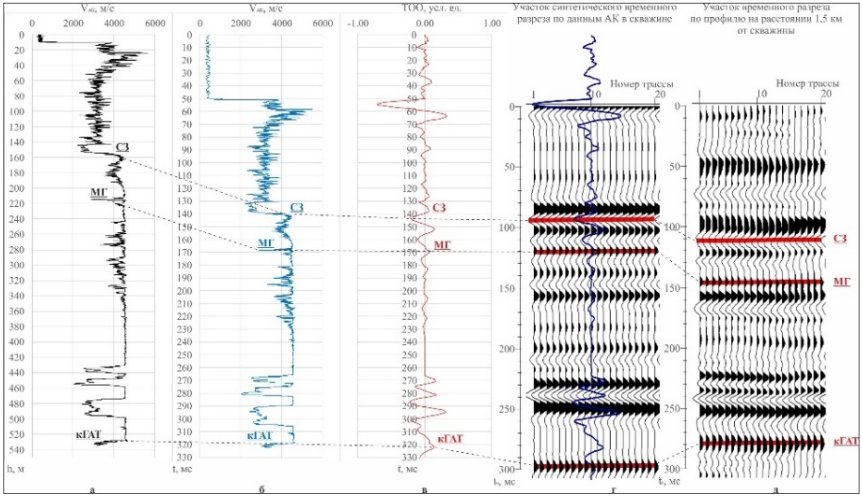

Рисунок 8 – Привязка временных разрезов к данным АК в скв. на расстоянии 1,5 км от профиля (а – график скоростей в глубинной шкале, б – график скоростей во временной шкале, в – ТОО, г – участок синтетического разреза, д – участок наблюденного временного разреза)

В условиях отсутствия данных АК в скважинах, пробуренных в районе проведения сейсморазведочных работ предлагается проводить построение моделей среды на основе зависимости между литологией и интервальной скоростью взятых с других участков месторождения. В качестве исходных данных при таком подходе используются геологические колонки скважин на исследуемом участке и АК, проведенный в ближайших скважинах к исследуемому участку. Для построения псевдо-акустической кривой (ПАК) предлагается использовать данные о литологическом строении участка, закономерностях между литологией и изменением скоростей продольных волн, результаты АК в ближайших скважинах и результаты корреляции АК на разных участках ВКМС.

Помимо использования данных ПАК (Рисунок 9) при построении модели для решения прямой задачи, на этапе привязки впервые использовались данные шахтной сейсморазведки способом ПВРО (Рисунок 9д). Привлечение данных ПВРО позволило повысить надежность привязки отражающих горизонтов, полученных с помощью поверхностной сейсморазведки. Совместное использование данных наземной и шахтной сейсморазведки перспективно. Описанный выше подход предлагается использовать на этапе обработки и интерпретации для привязки сейсморазведочных данных и решения сложных горнотехнических задач.

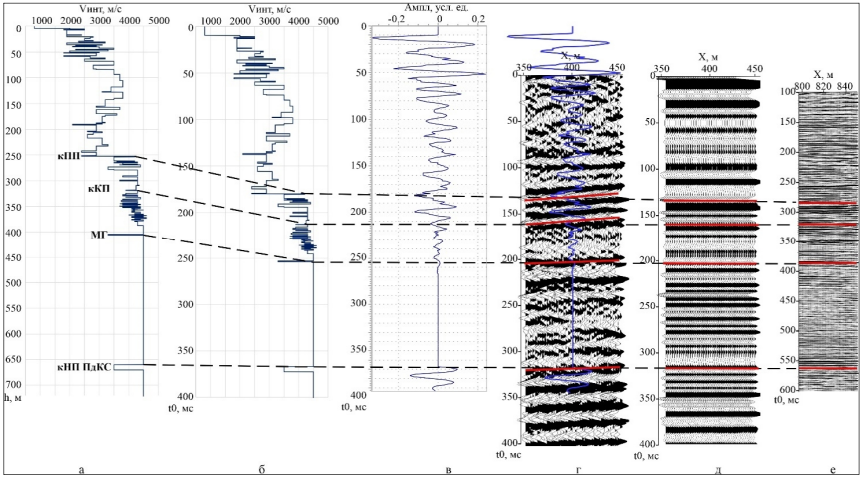

Рисунок 9 – Привязка временных разрезов к данным ПАК (а – график скоростей по данным ПАК в глубинной шкале, б – график скоростей по данным ПАК во временной шкале, в – ТОО, г – участок наблюденного разреза, д – участок синтетического разреза, е – участок шахтного разреза)

Четвертое защищаемое положение. *Разработана методика динамической интерпретации данных малоглубинной сейсморазведки, основанная на регрессионном анализе сейсмических атрибутов, позволяет изучать особенности геологического строения соляной толщи и выделять тектонические нарушения.*

По результатам моделирования установлено, что выделение отражений от тонких слоев, внутри малоконтрастной соляной толщи, при вертикальной разрешающей способности в среднем 15 м затруднительно. При этом суммарный вклад этих слоев в интерференционную картину может быть ощутимым. Для определения этого влияния проведены исследования, по результатам которых предлагается использовать для интерпретации статистические зависимости ряда параметров интерференционной картины от эффективных свойств пачки слоев. В основе предлагаемой методики поисков тектонических дислокаций в условиях ВКМС лежит атрибутный анализ.

В рамках исследований атрибутному анализу подвергались результаты расчетов теоретических волновых полей для основных типов тектонических нарушений, встреченных на ВКМС геологами. Применение конечно-разностной схемы расчета и использование детальных тонкослоистых моделей по данным АК обеспечивает высокую степень приближения к результатам, наблюденным в реальных условиях. В случае, когда связь между сейсмическими атрибутами устойчивая, соответствующие атрибуты используются при дальнейших расчетах, если нет – исключаются из расчетов. Отобранные атрибуты (коррелирующие между собой) нормировались и суммировались в суммарный сейсмический атрибут (ССА), который гораздо более устойчив в плане чувствительности к искомым дислокациям. В основе правил обоснования суммирования лежат результаты расчетов

стандартного отклонения и физическое понимание причин изменения атрибутов. Часть атрибутов реагирует на неоднородности одного типа разных размеров разнонаправленно, что оценивается как отсутствие корреляции. Найдены зависимости между присутствием тектонических нарушений и изменением физических свойств (Рисунок 10) по 74 тонкослоистым моделям, построенным по данным АК.

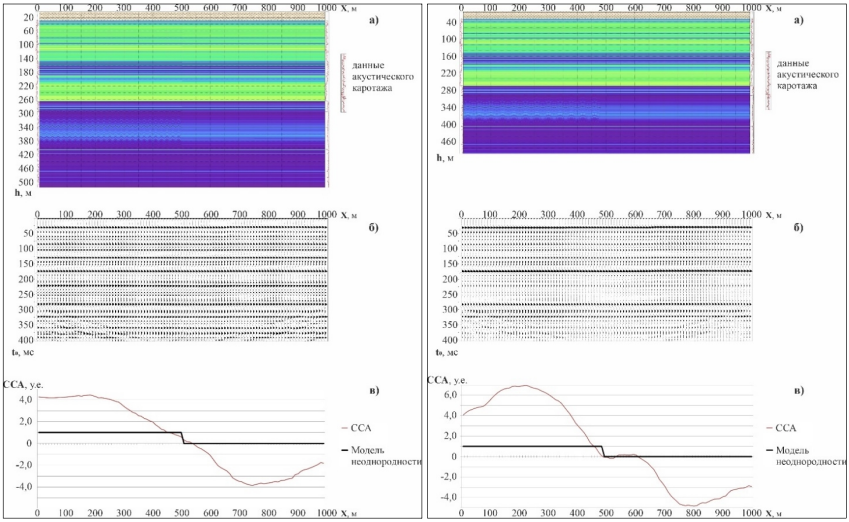

Рисунок 10 – Моделирование и АА зоны складчатости с вертикальными размерами 5 м, горизонтальными 10 и 40 м (а – тонкослоистая модель среды, б – синтетический разрез; в – график ССА)

Установлено, что некоторые атрибуты реагируют на наличие дислокаций закономерно – положительно, либо отрицательно. Каждый из атрибутов реагирует на геологическую неоднородность только в некоторых случаях. В результате появилась возможность выбрать относительно устойчиво работающие атрибуты, найти закономерности и объединить их в различные ССА, характерные для определенных типов тектонических нарушений. Исходя из регрессионного анализа установлено, что каждому типу геологической дислокации соответствует свой ССА, который может быть не похож на ССА для выделения дислокаций других типов, и даже одного типа, но разных размеров. Из общего числа атрибутов можно выделить наиболее чувствительные, но это будет только статистической оценкой, которая не дает основания использовать данные атрибуты как универсальные, применимые для локализации любых геологических неоднородностей.

Зоны складчатости выделяются атрибутным анализом устойчиво тремя атрибутами, независимо от параметров складчатости. Отдельные симметричные антиклинальные складки локализуются атрибутным анализом лишь при амплитуде складок 5 м двумя атрибутами, и не обнаруживаются при большей амплитуде. Отдельные симметричные синклинальные складки фиксируются атрибутным анализом тремя атрибутами. Моделирование для синклинальных складок выполнено только для амплитуды 10 м, поэтому говорить об устойчивости

атрибутного анализа в целом для данного вида неоднородностей нельзя. Флексурные складки, зоны трещиноватости, разрывные нарушения и зоны дробления не фиксируются атрибутным анализом ни при каких размерах. Для зон замещения продуктивного пласта каменной солью АА показывает работоспособность при мощности замещенного пласта более 40 м. Шесть атрибутов чувствительны к неоднородностям такого типа и размеров.

По результатам интерпретации по моделям, рассчитанным с плоской волной, были получены наборы сейсмических атрибутов, устойчиво реагирующих на складчатость. После чего проведен анализ по усложненным моделям складчатых зон, полученным с помощью расчета сферической волны. В результате атрибутного анализа построены разрезы ССА для зон складчатости протяженностью 500 м с различным размером отдельных складок (Рисунок 11).

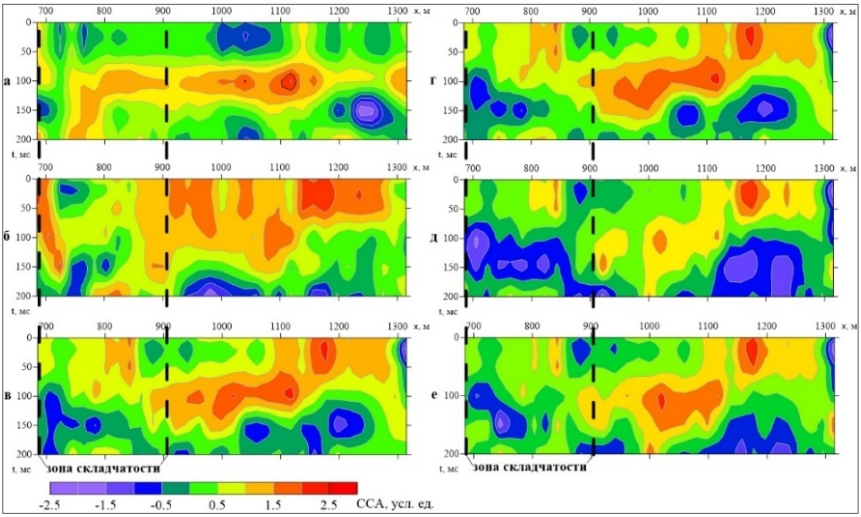

Рисунок 11 – Разрезы ССА (горизонтальные и вертикальные размеры зоны складчатости: а – 5х10 м; б – 50х10 м; в – 15х30 м; г – 30х30 м; д – 50х50 м; е – 100х150 м)

Результаты АА подтверждают выводы, сделанные на моделях, рассчитанных с плоской волной. Установлено влияние размеров складок на изменение значений сейсмических атрибутов. Отмечаются артефакты, которые вероятно возникают при расчете синтетических сейсмограмм и подчеркиваются на этапе обработки. Для оптимизации процесса работы с сейсмическими атрибутами разработано программное обеспечение AtAn, позволяющее проводить регрессионный анализ по нескольким расчетным схемам.

Для апробации предлагаемой методологии проведены опытно-методические исследования. Работы на опытном полигоне выполнены взрывным источником упругих колебаний с весом зарядов аммонита 200 г, погруженных в скважины глубиной 1,5 м. Результаты опытных работ представлены на рисунке 12.

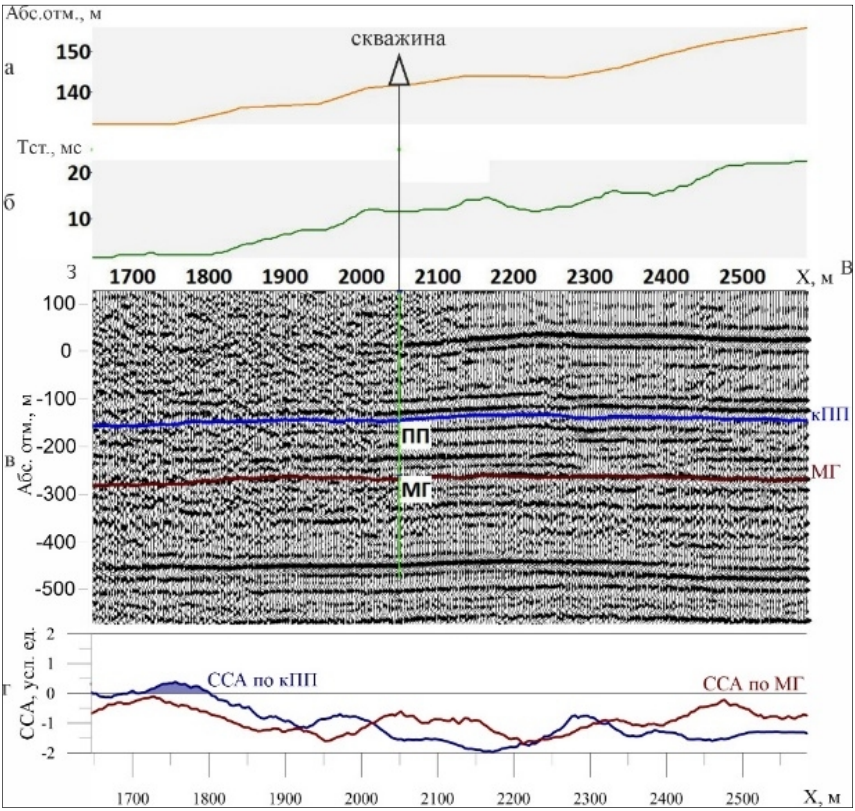

Рисунок 12 – Результаты апробации (а – рельеф, б – статические поправки, в – глубинный разрез, г – графики ССА для выделения зон интенсивной складчатости)

Участок исследований характеризуется преобладанием песков в приповерхностной части разреза в начале сейсморазведочного профиля. По этой причине полученный разрез можно разделить на две части, значительно отличающихся по динамической выразительности осей синфазности. На разрезах присутствуют места прерывания осей, меняется их амплитуда и видимая частота. Визуально выделить нарушения структуры волновой картины сложно и такое выделение будет субъективным. Поэтому для отражающих горизонтов кПП и МГ, согласно разработанной методике рассчитан ССА, нацеленный на выделение зон интенсивной складчатости, как единственный обоснованно работоспособный.

По полученным графикам (Рисунок 12г), прогнозируется наличие зон интенсивной складчатости в строении соляной толщи на участке Верхнекамского месторождения солей. Графики ССА для рассматриваемых профилей указывают на наличие зоны складчатости в пределах пикетов 1725–1800 м. В интервале пикетов от 2050 до 2600 м отражения динамически выраженные, залегание пластов субгоризонтальное и АА показывает отсутствие складчатости, что закономерно.

Предложенная методика интерпретации позволяет спрогнозировать наличие зон интенсивной складчатости в строении соляной толщи. Анализ результатов динамической интерпретации и структурных особенностей залегания кровли ПП и пласта МГ, изменение глубины залегания этих границ, позволяет оценить полноту ВЗТ и выявить аномальные области, связанные с тектоническими дислокациями и другими геологическими процессами.

Методология малоглубинной сейсморазведки внедрена в процесс разведочных работ на Верхнекамском месторождении солей и рекомендуется при поисково-разведочных работах на месторождениях калийных солей и других твердых полезных ископаемых.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты исследований по теме диссертационной работы сводятся к следующему:

1. Проведены опытные полевые сейсморазведочные работы и сравнительный анализ результатов, полученных с применение импульсного порохового и взрывного источников упругих колебаний. Обоснован выбор параметров системы наблюдений при проведении малоглубинной сейсморазведки на месторождениях калийных солей. Предложено использование взрывного источника упругих колебаний при проведении малоглубинной сейсморазведки, погруженного в скважины.

2. Предложена технология обработки данных малоглубинной сейсморазведки в условиях малоконтрастной соляной толщи. Выполнен анализ влияния процедур обработки сейсморазведочных данных на итоговый результат – временной разрез. Проведена корректировка графа обработки с учетом требований, предъявляемых к данным для последующей динамической интерпретации. Исключено многократное применения процедур пространственно-временной (когерентной) фильтрации из графа обработки. Обосновано использование данных геофизических исследований скважин и сейсмического моделирования в процессе обработки сейсморазведочных данных.

3. Обосновано применение сейсмического моделирования в процессе проведения сейсморазведки на Верхнекамском месторождении солей, проведен анализ и выбор оптимальных параметров моделирования. Построена 81 тонкослоистая модель с неоднородностями строения водозащитной толщи и тектоническими дислокациями разных размеров, на основе которых получены синтетические данные.

4. Определены закономерности между изменением атрибутов регистрируемого сигнала и наличием различных тектонических нарушений, на основе которых обосновано применение атрибутного анализа при выделении тектонических нарушений в галогенной формации. Разработан алгоритм и программное обеспечение AtAn, позволяющее оперативно обрабатывать, визуализировать и проводить регрессионный анализ графиков сейсмических атрибутов. Установлено, что одним суммарным сейсмическим атрибутом надежно выделить возможно только протяженные зоны складчатости. Остальные тектонические нарушения на основе анализа атрибутов выделяются неоднозначно или не выделяются совсем.

5. Проведена апробация разработанной технологии полевых работ, предлагаемых методик обработки и интерпретации. Полученные в результате апробации глубинные разрезы характеризуются контрастными отражениями, соответствующими кровле соляной толщи, пласту маркирующих глин и подошве соляной толщи, а также слабоконтрастными отражениями внутри соляной толщи.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК

1. 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.
2. 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.
3. Жуков, А. А. Опыт применения комплекса геофизических методов для выявления карстовых полостей в отвалах калийных рудников / А. А. Жуков, А. М. Пригара, И. Ю. Пушкарева, **Р. И. Царев** // ГИАБ. – 2015. – №5. – С. 120-130.
4. Жуков, А. А. Оценка скорости распространения электромагнитных волн в солях Верхнекамского месторождения солей / А. А. Жуков, А. М. Пригара, И. Ю. Пушкарева, **Р. И. Царев** // Инженерные изыскания. – 2017. – №3. – С. 28-33.
5. 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.
6. **Царев, Р. И.** Обоснование выбора модели геологической среды при решении прямой задачи сейсморазведки МОВ ОГТ на ВКМС / **Р. И. Царев** // Геофизика. – 2018. – №5. – С. 18-23.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. **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.

Публикации в изданиях, индексируемых в Scopus, WoS и РИНЦ

11. Пушкарева, И. Ю. Опытные геофизические работы по разработке методики поисков полостей в солеотвалах / 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.

12. **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.
13. 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.
14. **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.
15. Жуков, А. А. Оценка применимости сейсморазведочных методов при обнаружении карстовых полостей в условиях солеотвалов / А. А. Жуков, А. М. Пригара, **Р. И. Царев**, И. Ю. Шусткина, В. А. Ворошилов // Материалы научно-практической конференции «Инженерная сейсморазведка и сейсмология». – 2019.
16. Жуков, А. А. Особенности применения сейсморазведки на поперечных волнах в условиях подземных выработок калийного рудника / А. А. Жуков, А. М. Пригара, **Р. И. Царев**, И. Ю. Шусткина, В. А. Ворошилов // 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. 86-89.
17. Жуков, А. А. Обнаружение карстовых полостей комплексом геофизических методов в отвалах горнодобывающей промышленности / А. А. Жуков, А. М. Пригара, **Р. И. Царев**, И. Ю. Шусткина, В. А. Ворошилов // 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. 90-94.
18. 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.
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. **Царев, Р. И.** Технология и особенности проведения малоглубинных сейсморазведочных работ / **Р. И. Царев** // Международная научно-практическая конференция «РУДНИК», Выставка-форум «Нефть и газ. Химия - 2020». – 2020.
21. 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.

22. **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.
23. **Царев, Р. И.** Сейсмическое моделирование основных геологических неоднородностей, встречающихся в соляной тектонике / **Р. И. Царев** // Труды IV Международной геолого-геофизической конференции «ГеоЕвразия 2021. Геологоразведка в современных реалиях». – 2021. – С. 47-52.
24. Voroshilov, V. A. Integration of Surface and Mine Gravity Data for Localization Structural Faults on the Verkhnekamskoye 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.

Патенты на изобретения

25. **Патент № 2709415 C1 Российская Федерация, МПК G01V 1/00, G01V 1/28, G01V 1/30.** Способ шахтной сейсмической разведки : № 2019109747 : заявл. 02.04.2019 : опубл. 17.12.2019 / А. М. Пригара, А. А. Жуков, **Р. И. Царев**, И. Ю. Шусткина, В. А. Ворошилов ; заявитель Акционерное общество "ВНИИ Галургии" (АО "ВНИИ Галургии"). – 10 с. : ил. - Текст : непосредственный

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

26. **Царев, Р. И.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020610568 Российская Федерация. Программа атрибутного анализа AtAn. Версия 1.0 : № 2019667160 : заявл. 23.12.2019 : опубл. 16.01.2020 / **Р. И. Царев**, В. А. Ворошилов, А. М. Пригара, А. А. Жуков, И. Ю. Шусткина ; заявитель Акционерное общество «ВНИИ Галургии» (АО «ВНИИ Галургии»).
27. Пригара, А. М. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020610268 Российская Федерация. Программа обработки шахтных сейсмических данных FastMineProc. Версия 1.0 : № 2019667231 : заявл. 23.12.2019 : опубл. 13.01.2020 / А. М. Пригара, В. А. Ворошилов, А. А. Жуков, И. Ю. Шусткина, **Р. И. Царев**; заявитель Акционерное общество «ВНИИ Галургии» (АО «ВНИИ Галургии»).
28. Ворошилов, В. А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020610309 Российская Федерация. Программа поиска годографов дифрагированных волн GodFind. Версия 1.0 : № 2019667093 : заявл. 23.12.2019 : опубл. 13.01.2020 / В. А. Ворошилов, А. М. Пригара, **Р. И. Царев**, А. А. Жуков, И. Ю. Шусткина ; заявитель Акционерное общество «ВНИИ Галургии» (АО «ВНИИ Галургии»).
29. Ворошилов, В. А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020660506 Российская Федерация. Программа контроля и документирования полевых сейсморазведочных работ EJ. Версия 1.0 : № 2020619619 : заявл. 26.08.2020 : опубл. 04.09.2020 / В. А. Ворошилов, А. М. Пригара, **Р. И. Царев**, А. А. Жуков, И. Ю. Пушкарева ; заявитель Акционерное общество «ВНИИ Галургии» (АО «ВНИИ Галургии»).

Подписано в печать 09.03.2022.Формат 60x90/16
Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 153.
Отпечатано в ООО "Типография "Здравствуй"
614068, г. Пермь, ул. Данщина, 7Д.
Тел. (342) 270-14-05