# МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего

## образования

# «ПЕРМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

#/

ЦАРЕВ Роман Ильич

# МЕТОДОЛОГИЯ МАЛОГЛУБИННОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ

Специальность 25.00.10

Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор

Костицын Владимир Ильич

### оглавление

введение	4
ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ	15
ГЛАВА 1. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ	15
1.1 Характеристика месторождения	15
1.2 Стратиграфия и литология	18
1.3 Тектоника	26
1.4 Характеристика соляной толщи	30
1.5 Геологические процессы	33
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1	36
ГЛАВА 2. ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛЕВЫХ РАБОТ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ	
МАЛОГЛУБИННОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ	37
2.1 Анализ технологии полевых работ применяемой в настоящее время	37
2.2 Обоснование использования взрывного источника упругих колебаний	
при проведении малоглубинной сейсморазведки	44
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2	55
ГЛАВА 3. ТОНКОСЛОИСТАЯ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ	
СРЕДЫ	56
3.1 Обоснование параметров сейсмического моделирования	58
3.2 Исходные данные для сейсмического моделирования	65
3.3 Технология сейсмического моделирования	65
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3	81
ГЛАВА 4. ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ МАЛОГЛУБИННОЙ	
СЕЙСМОРАЗВЕДКИ	83
4.1 Подготовка данных к цифровой обработке	85
4.2 Технология цифровой обработки сейсморазведочных	
материалов	90
4.3 Сейсмическое моделирование в процессе обработки	100
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4	107

## ГЛАВА 5. МЕТОДИКА ВЫДЕЛЕНИЯ ТЕКТОНИЧЕСКИХ

НАРУШЕНИЙ	108
5.1 Атрибуты волнового поля и атрибутный анализ	108
5.2 Алгоритм получения суммарного сейсмического атрибута на основе	
разработанного программного обеспечения AtAn	111
5.3 Результаты атрибутного анализа	114
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5	130
ГЛАВА 6. АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ	132
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 6	135
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	137
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	139
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	141
ПРИЛОЖЕНИЕ А. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И	
ИНТЕРПРЕТАЦИИ	146

#### введение

#### 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 в исследуемой области

Основы теории упругости среды, колебательных процессов и распространения сейсмических волн связаны с именами великих ученых: Гука Р., Бернулли, Гюйгенса Х., Ферма П., Рэлея Д.У., Ломоносова М.В., Стокса Д.Г., Кельвина У. и других.

Технологией и теорией сейсморазведочных исследований, решением прямой и обратной задачи сейсморазведки, а также интерпретацией на основе динамических и кинематических характеристик волнового поля занимался ряд A.C., P., Авербух А.Г., Алексеев Амброн Ампилов Ю.П., ученых: Антокольский М.Л., Астапенко В.Н., Баранов В.Н., Бат М., Бембель Р.М., Берзон И.С., Боганик Г.Н., Бондарев В.И., Браун А., Бяков Ю.А., Вихерт Э., Воскресенский Ю.Н., Воюцкий В.С., Гамбурцев Г.А., Гельфанд В.А., Гертнер Х., Гильберштейн П.Г., Гогоненков Г.Н., Голицын Б.Б., Гурвич И.И., Дик П.И., Дикс К., Епинатьева А.М., Знаменский В.В., Илмаз О., Каштан Б.М., Коптев В.И., Корягин В.В., Крылаткова Н.А., Кузнецов В.М., Кучер В.И., Кюнец Г., Ловля С.А., Ляховицкий Ф.М., Маллет Р., Маловичко А.А., Мейкин Дж., Мешбей В.И., Милн Дж., Михайленко Б.Г., Михальцев А.В., Минтроп Л., Никифоров П.М., Никитин В.Н., Оболенцева И.Р., Олдхэм Р.Д. Палагин В.В., Попов А.Я., Потапов О.А., Птецов С.Н., Пузырев Н.Н., Ратникова Л.И., Ризниченко Ю.В., Рябинкин Л.А., Савич А.И., Спасский Б.А., Стиганд Ю.А., Столбова Т.А., Урупов А.К., Уэрдингтон М., Хаттон Л., Хилтерман Ф.Д., Шерифф Р., Шехтман Г.А., Шнеерсон М.Б., Шихов С.А., Шихов Б.С., Череповский А.В. и многие другие.

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 выполнении работы над диссертацией.

#### Цель исследований

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.

#### Объект исследований

Объектом исследований является соляная толща Верхнекамского месторождения солей, 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.

#### Задачи исследований

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 при малоглубинных данных 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 ВКМС. Разработать галогенной формации на алгоритм И программное обрабатывать, обеспечение, позволяющее оперативно 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

Научная новизна проведенных исследований заключается в следующем:

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 (ЭСМ), 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.

8

#### Практическая и теоретическая 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 ВКМС И модель полноволновое сейсмическое моделирование на ее основе позволяет изучить особенности распространения сейсмических волн в условиях близких к естественному залеганию Адекватная геологическому строению пород. 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 MOB ΜΟΓΤ, 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 причине ПО 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 калийных солей. разведки построение поисков И 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.

#### Защищаемые положения

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

10

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.

обработки, 3. Разработана технология 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 особенности сейсмического сохранить все 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 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.

#### Апробация результатов

Автором написано и опубликовано 24 статьи, из них 10 в рецензируемых изданиях ВАК и 11 индексируемых в Scopus и Web of Science. Результаты 9 исследований докладывались на конференциях: Международная научно-практическая конференция «Теория разведочной И практика И геофизики», ПГНИУ, г. Пермь, 2014 г; промысловой Международная научно-практическая конференция «Инженерная и рудная геофизика 2019»,

г. Геленджик, 2019 Научно-практическая конференция «Инженерная г; сейсморазведка И сейсмология», г. Москва, 2019 г; Международная научно-практической конференция, приуроченная к 90-летию со дня основания «Уралмеханобр», г. Екатеринбург, 2019 института 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 [32].

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 [13, 21, 29].

Совместно со специалистами НИЛ Геофизики АО «ВНИИ Галургии», разработано программное обеспечение: GodFind – программа поиска когерентности годографов дифрагированных волн на временных разрезах [9]; FastMineProc – программа расчета геометрии системы наблюдения и экспрессобработки данных шахтной сейсморазведки [23]; EJ – программа ведения электронного полевого журнала, документирования и расчета геометрии системы наблюдений [10].

#### Объем и структура 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

12

источников из 42 наименований и 1 приложение.

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.

#### Исходные материалы и личный вклад автора

Личный вклад автора заключается в следующем:

– Проведены опытные полевые сейсморазведочные исследования с целью обоснования и выбора источника упругих колебаний, внедрение практики применения взрывного источника при малоглубинных сейсморазведочных работах на месторождениях калийных солей. При проведении полевых работ предлагается использовать одиночные сейсмоприемники с шагом между ППр от 2 до 5 м, ПВ от 5 до 10 м, с применением высокоточной топографо-геодезической съемки ППр и ПВ и заглублением зарядов, рекомендации внедрены в процесс производства работ на ВКМС;

Проанализированы архивные скважинные данные на предмет изученности территории месторождения методами АК И вертикального сейсмического профилирования (ВСП), даны рекомендации специалистам геологам с обоснованием необходимости проведения АК и ВСП при бурении

солеразведочных скважин;

– Построены тонкослоистые геолого-геофизические модели с присутствием основных типов тектонических нарушений различных размеров, встречающихся на ВКМС, на основе данных АК. Проведено сейсмическое моделирование. Сейсмическое моделирование внедрено в процесс проектирования сейсморазведочных работ, обработки и интерпретации данных. Проведен статистический анализ и выявлены закономерности между изменением атрибутов волновой картины и тектоникой изучаемого разреза. Разработан алгоритм регрессионного анализа и визуализации результатов динамической интерпретации, реализованный в рамках программного обеспечения AtAn.Проведена апробация методики поисков тектонических дислокаций на реальных объектах ВКМС с обоснованием и оценкой ее возможностей и ограничений.

Ценность научных работ соискателя состоит в усовершенствовании технологии проведения малоглубинной сейсморазведки на месторождениях калийных солей, получении качественных исходных материалов, пригодных для проведения динамической интерпретации на новом технологическом уровне. Основная ценность заключается в объективных структурных построениях геологической среды, с возможностью проведения кинематической, динамической и геологической интерпретации.

#### ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

#### ГЛАВА 1. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

#### 1.2 Стратиграфия и литология

Верхнекамское месторождение солей является одним из крупнейших месторождений калийных солей в мире и является основной сырьевой базой, на которой происходит развитие калийной промышленности Российской Федерации. Интенсификация добычи калийных солей создала острую необходимость в глубоком всестороннем познании строения соляной толщи Верхнекамского месторождения и, в частности, выявления в ней наличия внутрисоляных деформаций. В связи с отсутствием достаточно полных сведений об особенностях строения и закономерностях распространения внутрисоляных деформаций, среди геологов нет единства взглядов на формирование соляных структур и особенностей их разработки [17].

Опыт аварий и последующего затопления рудников БКПРУ-1, БКПРУ-3 и СКРУ-2 свидетельствует о необходимости детального изучения особенностей залегания и тектоники соляной толщи.

Верхнекамское месторождение солей располагается в пределах Пермского Края, главным образом на левобережье реки Кама (Рисунок 1). В административном отношении оно находится в Чердынском, Красновишерском, Соликамском, Усольском и Добрянском районах, а также на территориях, подчиненных городам Березники и Александровску [17].



Рисунок 1 – Географическое положение ВКМС (штриховкой отмечена площадь развития соляной залежи) [17]

Соляная толща месторождения имеет форму линзы площадью около 8,2 тыс. км<sup>2</sup> и прослеживается в меридиональном направлении на 206 км, в широтном до 56 км (Рисунок 2).



Рисунок 2 – Площадь распространения Верхнекамского месторождения солей (1 – контур соляной залежи, 2 – залежь калийно-магниевых солей) [17]

Внутри контура соляной толщи расположена многопластовая залежь калийно-магниевых солей протяженностью 140 км при ширине до 41 км. Площадь основной части калийной залежи по внешнему контуру составляет 3,7 тыс. км<sup>2</sup>.

Месторождение комплексное: на его базе ведется добыча сильвинитов (сырье для производства калийных удобрений), карналлитовой породы (сырье для получения искусственного карналлита для магниевой промышленности) и рассолов (сырье для производства соды, энергетика и др.). Геологические запасы месторождения огромны и оцениваются по карналлитовой породе в 96 млрд. т, по сильвинитам – 113 млрд. т, по каменной соли – 4,7 трлн. т.

Главным водотоком является р. Кама, протекающая в западной части месторождения. До широты г. Соликамска сказывается влияние подпора Камского водохранилища. Гидрографическая сеть района представлена, кроме Камы, реками Колва, Вишера, Язьва, Яйва, Косьва и их притоками. Основной источник питания рек – талые воды (более 60% годового стока), поэтому для рек характерны продолжительный ледостав, высокое весеннее половодье, низкая летняя и зимняя межень. В северной части ВКМС расположено мелководное (до 2,5 м) оз. Нюхти (длина – 3,4 км, ширина – 2,2 км).

Преобладающая часть площади района месторождения (немного более 60%) покрыта лесом с преимущественным развитием хвойных пород. На севере площади, в зоне развития песчаных водно-ледниковых отложений, широким развитием пользуются сосново-березовые леса, а к югу от широты г. Березники к ним примешивается липа. Свободная от леса территория представлена сенокосами и в меньшей степени – пашней. Почвы в основном подзолистые и дерново-подзолистые, в районах развития болот – болотистые торфяные, в не заболоченных долинах рек – дерново-луговые [17].

#### 1.2 Стратиграфия и литология

Геологический разрез района ВКМС наиболее полно изучен опорной (скв. 1-ОП, глубина 2973 м) и нефтепоисковыми (самая глубокая скв. 37-ОГН, Уньвинская площадь, глубина 2912 м) скважинами. Этими скважинами вскрыты

18

породы кудымкарской свиты (V<sub>kd</sub>) валдайской серии вендского комплекса, представленные алевролитами неравномерно глинистыми, ангидритизированными, с обугленными растительными остатками; аргиллитами слюдистыми, зеленовато-серыми и буро-коричневыми, песчанистыми; песчаниками косослоистыми, реже массивными, кварцевыми, мелкозернистыми. Вскрытая мощность вендского комплекса – 342 м. Выше залегают отложения девонской, каменноугольной, пермской, палеогеновой, неогеновой и четвертичной систем (Рисунок 3).

Отложения девонской системы, в объеме среднего и верхнего отделов, со стратиграфическим перерывом залегают на породах вендского комплекса. Разрез системы представлен двумя толщами: нижней – терригенной и верхней – карбонатной.

Терригенная толща включает отложения эйфельского и живетского ярусов среднего девона, а также франского яруса верхнего девона.

Средний отдел (D<sub>2</sub>) в своей нижней части представлен алевролитами, песчаниками и аргиллитами. Алевролиты и песчаники пестроокрашенные, кварцевые. Аргиллиты пестроцветные, алевритистые, неяснослоистые. В верхней части разреза наблюдается переслаивание алевролитов и аргиллитов с редкими прослоями песчаников. Мощность отдела колеблется от 10 до 75 м. Верхний отдел (D<sub>3</sub>) представлен отложениями франского и фаменского ярусов.

Франский ярус. Нижняя часть разреза франского яруса в объеме пашийского и низов тиманского горизонтов представлена терригенной пачкой – D<sub>3</sub>f (терр.), сложенной алевролитами неравномерно глинистыми, песчаниками кварцевыми и аргиллитами алевритистыми и известковистыми. Мощность пачки – от 6 до 30 м. Кровля терригенной пачки является отражающей поверхностью и при сейсморазведочных работах обозначается как отражающий горизонт III (ОГ III).

Разрезы карбонатной части франского яруса (D<sub>3</sub>f) и отложения фаменского яруса (D<sub>3</sub>fm), литологические особенности которых определялись развитием рифовых массивов и разделявших их межрифовых впадин, группируются в рифовый и межрифовый (впадинный) типы [17].



Рисунок 3 – Геологический разрез Соликамской впадины

(1 – карбонатные и существенно карбонатные отложения; 2 – рифовые постройки; 3 – преимущественно терригенные отложения; 4 – «терригенный клин»; 5 – каменная соль; 6 – калийная залежь; 7 – Всеволодо-Вильвенский надвиг; 8 – по подошве соляной толщи (ОГ С); 9 – по кровле терригенной – а (ОГ АТ) и карбонатной – б (ОГ АК) толщ артинского яруса; 10 – по кровле терригенной пачки визейского яруса (ОГ II); 11 – по кровле терригенной пачки тиманского горизонта (ОГ II); скважины и их номера: 12 – солеразведочные; 13 – нефтяные; 14 – структурные) [17]

Рифовый тип разреза выделяется на рифовых выступах и одиночных массивах. Его подразделяют на склоновый, гребневый и платформенно-лагунный подтипы. Смена указанных типов и подтипов разрезов происходит постепенно.

Межрифовый (впадинный) тип разреза представлен известняками, в различной степени окремнелыми, с подчиненными прослоями битуминозных известняков, сланцев и кремней. Мощности этого типа разреза для данного стратиграфического подразделения являются минимальными.

С приближением к рифовым массивам со стороны впадин, в склоновом подтипе разреза, начинают преобладать небитуминозные, чистые разности карбонатных пород. Мощности отложений возрастают. По мере приближения к центральным частям массивов исчезают серые, темно-серые известняки и прослои битуминозных сланцев с кремнями.

Гребневый подтип представлен светло-серыми, почти белыми известняками, местами доломитизированными, органогенно-детритовыми, с неясной крупной слоистостью. Известняки и доломиты местами пропитаны нефтью, в различной степени окисленной, нередко до твердого битума. Мощности разреза в этом подтипе максимальные.

К платформенно-лагунному подтипу отнесены разрезы, развитые в центральных частях рифовых выступов и одиночных рифовых сооружений. Здесь известняки преимущественно светлоокрашенные, светло-серые, почти белые, органогенно-детритовые, доломитизированные, переходящие во вторичные доломиты. Иногда наблюдаются тонкие прослои аргиллита известкового. Мощность карбонатной части разреза франского яруса – от 95 до 405 м. Мощность отложений фаменского яруса в интервале 70–210 м.

Каменноугольная система представлена нижним, средним и верхним отделами. Нижний отдел включает турнейский, визейский и серпуховский ярусы.

Турнейский ярус (C<sub>1</sub>t) развит не повсеместно. На девонских рифовых постройках отложения яруса либо отсутствуют, либо представлены в редуцированных мощностях [17].

В межрифовом типе в низах разреза породы турнейского яруса представлены

21

отложениями доманикового типа, сменяющимися на карбонатно-терригенный тип разреза. Известняки (40%) серые, глинистые, мелкодетритовые; аргиллиты (60%) темно-серые, почти черные, тонкоплитчатые.

Разрезы склонов рифовых сооружений также представлены чередованием темноокрашенных известняков и аргиллитов. В низах разреза преобладают карбонаты (70%). Известняки водорослевые, доломитизированные, прослоями окремнелые.

Разрезы мелководья (рифовые выступы и массивы) сложены известняками светло-серыми, детритовыми. Вверх по разрезу наблюдается переслаивание известняков и аргиллитов. Известняки органогенно-детритовые, мелкообломочные, с прослоями раковинно-известняковых песчаников. Мощность турнейского яруса изменяется от 0 до 270 м.

Визейский ярус (C<sub>1</sub>v). Нижняя часть разреза визейского яруса имеет терригенный состав – C<sub>1</sub>v (терр.). Она сложена (снизу-вверх) аргиллитами темносерыми, почти черными, чередующимися с алевролитами глинистыми, в самом основании разреза – с редкими прослоями известняков; песчаниками светлосерыми, известковистыми, с подчиненными прослоями аргиллитов и алевролитов глинистых, с углистыми растительными остатками. Мощность терригенной пачки изменяется в интервале 10–90 м. Кровля терригенной пачки является отражающей поверхностью и при сейсморазведочных работах используется как отражающий горизонт II (ОГ II).

Карбонатная часть разреза нижнего отдела каменноугольной системы (верхи визейского яруса и нерасчлененный серпуховский ярус) сложена известняками темно-коричнево-серыми, серыми, органогенно-детритовыми, доломитизированными, с типичной морской фауной или ее реликтами; доломитами вторичными серыми, разнозернистыми, с реликтовой органогенной структурой, с желваками ангидрита и кремня. Суммарная мощность карбонатной части разреза визейского яруса и серпуховского яруса изменяется от 110 до 530 м. Средний отдел каменноугольной системы (С<sub>2</sub>) представлен башкирским и московским ярусами [17]. Башкирский ярус (C<sub>2</sub>b) сложен известняками органогенно-детритовыми, перекристаллизованными. Породы участками доломитизированы и сульфатизированы. Местами известняк глинистый с прослоями аргиллита. В кровле яруса гравелиты, конгломератобрекчии. По всему ярусу нефтепроявления от слабых до обильных. Мощность яруса от 15 до 80 м.

Московский ярус (C<sub>2</sub>m) представлен неравномерным переслаиванием известняков, аргиллитов, доломитов. Известняки серые и темно-серые, глинистые, органогенно-обломочные, детритово-фораминиферовые, наблюдается доломитизация, сульфатизация, битуминозность по стилолитовым швам. Аргиллиты темно-серые, известковистые, слюдистые. Доломиты тонкозернистые, глинистые, крепкие, с гнездами ангидрита. Мощность яруса изменяется в интервале 195–305 м.

Верхний отдел каменноугольной системы (С<sub>3</sub>) сложен преимущественно доломитами с прослоями известняков. Доломиты серые, мелкозернистые, известковистые, кристаллические, прослоями глинистые, битуминозные, участками кавернозные. Наблюдается слабое окремнение и сульфатизация. Мощность отдела – 35–80 м.

Пермская система представлена отложениями ассельско-сакмарского, артинского, кунгурского и уфимского ярусов.

Ассельский + сакмарский ярусы (P<sub>1</sub>a+s). Нерасчлененные отложения ярусов сложены известняками серыми, темно-серыми, кристаллическими, плотными, крепкими, участками окремнелыми, прослоями органогенно-детритовыми, иногда глинистыми, битуминозными. Мощность их изменяется от 180 до 450 м.

Артинский ярус (P<sub>1</sub>ar) по литологическому составу подразделяется на две пачки: карбонатную и терригенную. Граница раздела пачек используется при сейсморазведочных работах как отражающий горизонт A<sup>K</sup> (ОГ A<sup>K</sup>) [17].

Карбонатная пачка (P<sub>1</sub>ar<sub>1</sub>) представлена известняками светло- и темносерыми, участками окремнелыми, органогенно-обломочными, с обильной фауной. Отмечено участие нижнеартинских карбонатных пород в формировании рифовых построек, к которым бывают приурочены проявления нефти. Мощность пачки – от 70 м в межрифовом пространстве и до 220 м в пределах рифовых сооружений.

Терригенная пачка распространена не повсеместно, а лишь в восточной половине Соликамской впадины, где она представлена урминской свитой (P<sub>1</sub>ur) и образует так называемый «артинский терригенный клин». «Клин» сложен флишоидно-молассовой толщей – аргиллитами, алевролитами и песчаниками с линзами и прослоями конгломератов, относительная роль которых постепенно возрастает в восточном направлении, по мере приближения к складчатому Уралу. Мощность толщи возрастает от 120 м на западе до 1500 м и более на востоке в зоне перехода к передовым складкам Урала.

В западной части Соликамской впадины урминская свита фациально сменяется на глинистые известняки, мергели и доломиты дивьинской свиты (P<sub>1</sub>dv). Мощность дивьинской свиты колеблется от 10 м (на участках развития нижнеартинских рифов) до 120 м в межрифовом пространстве.

Кровля терригенной пачки артинского яруса при сейсморазведочных работах используется как отражающий горизонт А<sup>T</sup> (ОГ А<sup>T</sup>).

Кунгурский ярус, отложения которого распространены на всей территории Соликамской впадины, представлен двумя горизонтами – филипповским и иренским.

Филипповский горизонт. На восточной окраине Русской (Восточно-Европейской) платформы и большей части Соликамской впадины распространен карбонатно-сульфатный тип разреза – карнауховская свита (P<sub>1</sub>kr). На восточной окраине Предуральского прогиба карбонаты и сульфаты замещаются обломочными породами лекской свиты (P<sub>1</sub>lk). Мощность горизонта – 50–160 м.

Иренский горизонт (P<sub>1</sub>ir) в пределах Соликамской впадины и прилегающей к ней части Русской платформы включает четыре одновозрастные свиты – иренскую, березниковскую, поповскую и кошелевскую, фациально сменяющие друг друга с запада на восток (Б.И. Грайфер, 1965) [17].

Иренская свита (P<sub>1</sub>ir), развитая в пределах восточной окраины Русской платформы, делится на семь пачек (снизу-вверх): ледянопещерскую (ir<sub>1</sub>), неволинскую (ir<sub>2</sub>), шалашнинскую (ir<sub>3</sub>), елкинскую (ir<sub>4</sub>), демидковскую (ir<sub>5</sub>),

тюйскую (ir<sub>6</sub>) и лунежскую (ir<sub>7</sub>), из которых нечетные сложены в основном ангидритовой породой, а четные представлены преимущественно доломитами и доломитизированными известняками, содержащими фауну брахиопод, пелеципод, фораминифер и др. Участками доломиты и известняки содержат прослои мергелей и глин. Мощности карбонатных пачек изменяются от 3 до 20 м, а ангидритовых – от 5 до 140 м. Мощность иренской свиты – от 110 до 385 м.

Березниковская свита (P<sub>1</sub>br), развитая в пределах большей части Соликамской впадины, представлена глинисто-ангидритовой и соляной толщами. Последняя включает калийную залежь ВКМС. При сейсморазведочных работах кровля глинисто-ангидритовой толщи используется как отражающий горизонт С (ОГ С). Мощность свиты изменяется в интервале 150–800 м.

Вдоль восточного борта Предуральского прогиба распространена кошелевская свита (P<sub>1</sub>ks), сложенная преимущественно песчаниками, алевролитами, аргиллитами и глинами. Мощность свиты от 100 до 300 м.

Уфимский ярус представлен соликамским и шешминским горизонтами, которые соответствуют одноименным свитам.

Соликамская свита подразделяется на две толщи – соляно-мергельную (СМТ – P<sub>1</sub>sl<sub>1</sub>) и терригенно-карбонатную (ТКТ – P<sub>1</sub>sl<sub>2</sub>).

СМТ сложена мергелями, глинами, гипсами, ангидритами и каменной солью. Ее средняя мощность около 100 м. Более подробно эта толща рассмотрена при характеристике галогенной формации Соликамской впадины.

ТКТ разделена В.И. Копниным [16] на две литозоны: нижнюю – плитняковую (мергельно-доломито-известняковую) и верхнюю – известково-терригенную. Плитняковая зона средней мощностью 65–70 м сложена известняками, доломитами и тонкослоистыми мергелями. Известково-терригенная литозона мощностью 52–64 м представлена аргиллитами, алевролитами, мелкозернистыми песчаниками и известняками. Общая мощность ТКТ колеблется от 90 до 170 м [17].

Шешминская свита (P<sub>1</sub>šš) представлена пестроцветной толщей (ПЦТ). Толща сложена песчаниками и алевролитами бурыми, зеленовато-серыми и серыми,

иногда с маломощными пропластками мергеля и известняка. Песчаники и алевролиты известковистые, косослоистые, нередко с медистыми соединениями в виде малахита и азурита (медистые песчаники). Наблюдается загипсованность в виде линзовидных прослоев, согласных и секущих прожилков гипса. В пределах ВКМС мощность шешминского горизонта изменяется от 0 до 675 м. Максимальные мощности приурочены к Дуринской площади месторождения [17].

Кайнозойские отложения палеогена и неогена на площади месторождения развиты фрагментарно.

К палеогеновым отложениям А.А. Иванов [14] условно отнес цветные глины (белые, желтые и др.) и кварцевые песчано-гравийно-галечные отложения, вскрытые в северной части Дуринской площади. Мощность этих отложений составляет до 17,4 м.

Неогеновые (верхнемиоценовые) отложения обнаружены в переуглублениях ложа древнего русла р. Пракамы. Они представлены глинами, песками и суглинками с прослоями торфа и лигнита. Возраст отложений установлен по растительным остаткам и пыльце. Мощность неогеновых отложений составляет 20–36 м.

Четвертичная система (Q) представлена рыхлыми образованиями различного происхождения: эоловыми песками (до 3 м), торфяно-болотными отложениями (до 5 м), аллювиальными песками, глинами, галечниками (1,5–30 м), озерноаллювиальными (до 25 м) и перигляциальными (до 10 м) супесями, суглинками и глинами, флювиогляциальными, моренными и другими образованиями (1,5–10 м). В отдельных случаях (переуглубления палеодолин, зоны выщелачивания солей и др.) мощность четвертичных отложений достигает 80 м [14].

#### 1.3 Тектоника

Верхнекамское месторождение солей тектоническом отношении В расположено В Соликамской впадине Предуральского прогиба краевого (Рисунок 4). Соликамская составляющей является частью впадина Уфимско-Соликамской мега впадины (Софроницкий, 1967, 1969).



Рисунок 4 – Структурно-тектоническое положение Соликамской впадины (1 – границы Предуральского краевого прогиба; 2 – границы седловин впадин: КС – Колвинская седловина, СолВ – Соликамская впадина, КЧС – Косьвинско-Чусовская седловина, СылВ – Сылвенская впадина; 3 – региональные разломы: Красноуфимский (I), Западно–Уральский (II), Предтиманский (III), Дуринский (IV), Боровицкий (V); 4 – контуры распространения соляной толщи (а) и калийной залежи ВКМС (б); 5 – линия геологического разреза) [17]

Соляная толща месторождения на фоне общей структуры Соликамской образует ряд брахиантиклинальных и куполовидных поднятий, впадины сопряженных с брахисинклинальными и мульдообразными понижениями. Соляные поднятия вытянуты субмеридианально с некоторым отклонением по отдельным поднятиям на северо-запад или северо-восток, длина поднятий от 7 до 26 км, ширина от 3 до 7 км. В поперечном сечении они асимметричны: западные крылья у них более крутые (3-6°), чем восточные (1-3°). В западной прибортовой зоне распространения соляной залежи наоборот крутыми являются восточные крылья соляных поднятий. Амплитуда соляных структур закономерно уменьшается в восточном направлении в сторону Урала от 300-350 до 30-50 м (Копнин, 1965).

П. А. Софроницкий (1967, 1969) в пределах Соликамской впадины по отложениям иренского горизонта и уфимского яруса выделяет с запада на восток Камско-Вишерский, Березниковский, Игумский валы и Харюшинский валик, расположенный между двумя последними валами. Валы протягиваются субмеридионально вдоль Соликамской впадины. В. И. Копнин (1966) в отличие от П. А. Софроницкого цепочки соляных поднятий называет не валами, а линиями поднятий, сохраняя те же названия.

Соляная толща по отношению к подсоленосным отложениям залегает резко дисгармонично. Непосредственно по подсоляному ложу наблюдается пологий (в среднем около 1°) моноклинальный наклон с востока на запад почти, до западной границы распространения калийной залежи. Вблизи складчатого Урала угол наклона подсоляного ложа составляет 5-10°.

Соляные структуры месторождения отчетливо прослеживаются по всем надсолевым горизонтам, но только в более плавном виде. Внутрисоляные деформации комплексов – это преимущественно пликативные дислокации. Складки и складчатые области отличаются не только по размерам, но и по глубине распространения [17].

Наличие и характер крупных дизъюнктивных дислокаций (разломов) на ВКМС являются предметом острых дискуссий. По мнению группы геологов,

возглавляемой д.г.-м.н. Н.М. Джиноридзе, главными элементами разрывной тектоники ВКМС являются три субмеридиональных региональных надвига – Усольский, Соликамский и Троицкий.

Предположение о наличии региональных надвигов – это система взглядов на многие стороны строения и генезиса ВКМС, представляющая (по мнению ее авторов) единую концепцию. Для того чтобы понять эту концепцию, необходимо привести основные термины и определения, которые были введены авторами при ее изложении в опубликованной и фондовой литературе [17].

Зоны РФСД (зоны разрывных и флексурно-складчатых деформаций) – участки максимального сжатия соляной толщи, сложенные относительно высокоамплитудными (более 10–15 м) опрокинутыми (вплоть до лежачих) флексурными складками и разрывными дислокациями, относящимися к категории Термодинамометаморфизм скалывания. \_ процессы разрывов изменения минералогии и химизма хлоридных калийно-магниевых солей совместно с расслоением и грануляцией каменной соли, образованием в ней структур и текстур динамофлюидального течения. Зона ТДР зона термодинамического разубоживания (зона галитизации сильвинита или зона разубоживания/замещения). Галитизация сильвинитов \_ процесс замены сильвинитов (красных, полосчатых, пестрых) каменной солью, который начинается снизу в красных сильвинитах и может распространяться вверх субгоризонтально через полосчатые и пестрые сильвиниты. Вязкий разрыв скалывания – поверхность перемещения соседних слоев или складок относительно друг друга без трещин скалывания или дробления (брекчирования) пород. Динамические разновидности каменной соли.

Региональные надвиги рассматриваются авторами гипотезы как сквозные системы разрывных дислокаций, которые развиты в подсолевом, солевом и надсолевом комплексах пород и имеют протяженность в несколько десятков километров.

Образование региональных надвигов связано с тектоническим давлением со стороны Урала, а причиной возникновения тангенциального давления и надвигов

в Предуральском краевом прогибе (включая ВКМС) в раннемезозойскую эпоху явилось растяжение молодой континентальной коры Урала. В результате этого давления соляная толща была смята в линейные западно-вергентные складки (флексурные, флексуроподобные, продольного изгиба) и формировались разрывные дислокации (надвиг, листрический сброс, сдвиг).

Региональные надвиги ассоциируются с зонами РФСД, ТДР и ДРК, причиной формирования которых является продольное сжатие слоистых литифицированных соляных толщ, механизм которого создает условия постепенного возрастания температуры (до 100°С), одностороннего тектонического давления [17].

#### 1.4 Характеристика соляной толщи

Галогенная формация на ВКМС представлена многопластовой залежью калийно-магниевых солей (P<sub>1</sub>br<sub>3</sub>). Залежь включает серию продуктивных пластов, разделенных каменной солью. По составу продуктивных пластов залежь калийно-магниевых солей делится на сильвинитовую и карналлитовую пачки.

Сильвинитовая пачка (P<sub>1</sub>br<sub>3</sub>sil) состоит из трех пластов красного сильвинита (KpIII, KpII и KpI) и пласта полосчатого сильвинита А, которые отделены друг от друга межпластовой каменной солью (KpII–KpIII, KpI–KpII, A–KpI). Промышленный интерес представляют: пласт А, который отрабатывается совместно с вышележащим пластом Б и пласт KpII. Пласты KpIII и KpI не отрабатываются и отнесены к забалансовым из-за низкого содержания KCl и/или некондиционной мощности соответственно.

Пласт КрIII на преобладающей площади шахтного поля состоит из трех сильвинитовых слоев (пластов) – КрIIIа, КрIIIб, КрIIIв, разделенных каменной солью. Пласты КрIII и КрII разделены пластом каменной соли КрII–КрIII [17].

Пласт КрII распространен практически на всей площади месторождения. При нормальном строении пласт подразделяется на семь слоев, из которых четные слои представлены преимущественно каменной солью, нечетные – красным сильвинитом. Местами имеет место полное или частичное замещение сильвинита каменной солью. Пласт КрII перекрывается, так называемым, технологическим

междупластьем КрІІ-АБ, в состав которого входят два пласта каменной соли и разделяющий их маломощный непромышленный пласт красного сильвинита КрІ.

Пласт А представлен полосчатым сильвинитом, в котором слои ярко окрашенного (красного, сургучно-красного, розового) сильвинита чередуются с серой или голубоватой каменной солью. Ниже подошвы пласта А (слой A-A') расположен сильвинитовый слой-спутник А'.

Карналлитовая пачка (P<sub>1</sub>br<sub>3</sub>crn) представлена пластами калийно-магниевых солей, разделенных пластами каменной соли. В нижней части пачки на отдельных площадях месторождения карналлитовая порода замещена пестрым сильвинитом. В верхней части пачки местами наблюдаются вторичные сильвиниты.

Выделяется девять основных пластов калийных солей, выдержанных в разрезе и на площади месторождения, которые индексируются буквами от Б до К.

Пласт Б представлен в основном пестрым сильвинитом, а в западной части шахтного поля – смешанными солями и карналлитом. Пласт Б залегает непосредственно на пласте А, образуя единый промышленный пласт АБ. Пласт Б перекрывается межпластовой каменной солью Б-В. В верхней части этого пласта довольно часто встречается слой-спутник пласта В – слой В', сложенный пестрым сильвинитом, отделенный от основного пласта В слоем каменной соли В'-В [17].

Пласт В состоит из шести слоев. К балансовым запасам солей пласта В отнесены лишь запасы карналлитовой породы, сильвиниты же как по качеству, так и по горнотехническим условиям разработки отнесены к забалансовым. Пласт В перекрывается межпластовой каменной солью В-Г. Выше межпластовой соли В-Г залегают пласты преимущественно карналлитовой породы, чередующиеся с пластами каменной соли. В интервале разреза от пласта В-Г до пласта Е (так называемая зона мощных пластов) мощности пластов калийно-магниевых солей выше мощностей межпластовой каменной соли, в интервале от пласта Ж до К (зона тонких пластов) – соотношения обратные.

ПКС (P<sub>1</sub>br<sub>4</sub>) распространена на преобладающей площади Верхнекамского месторождения, но отсутствует на сводах некоторых поднятий. Каменная соль серая и светло-серая, местами светло-желтая и бледно-розовая; в нижней части отмечается

вкрапленность карналлита и сильвина. Порода имеет ярко выраженную слоистую текстуру, обусловленную чередованием прослоев различных структурных разновидностей галита и глинисто-ангидритового материала. Местами в средней части пачки присутствуют прослои мергелей.

Выше березниковской свиты залегают отложения уфимского яруса нижней перми: соликамский горизонт, выделенный в объеме соликамской свиты, разделенной, в свою очередь, на две подсвиты; шешминская свита.

Нижнесоликамская подсвита (P<sub>1</sub>sl<sub>1</sub>) венчает разрез галогенной формации и представлена соляно-мергельной толщей, сложенной мергелями, глинами, каменной солью и, в меньшей степени, известняками, гипсами и ангидритами. На долю глинисто-карбонатных пород приходится около 80 % разреза. В глинисто-карбонатных породах СМТ часто встречаются пирит, углефицированные растительные остатки, фауна пелеципод.

В разрезе СМТ выделяется девять ритмопачек. Семь нижних ритмопачек содержат по два пласта – глина или мергель (внизу) и каменная соль или гипсовая (глинисто–гипсовая) порода (вверху). Восьмая ритмопачка сложена внизу мергелями и глинисто-карбонатно-сульфатными породами, а вверху представлена глинисто-гипсовой породой. Девятая сложена глинистыми и карбонатными породами с прослоями гипса, реже – ангидрита. Восьмая и девятая ритмопачки, как правило, не содержат прослои каменной соли.

Нижняя часть СМТ, содержащая пласты каменной соли, носит название переходной пачки (ПП). Поверхность, проходящая по кровле первого сверху слоя каменной соли, называется соляным зеркалом и не является стратиграфической границей.

Из всей продуктивной толщи калийных солей на шахтном поле рудника промышленными являются пласты АБ и КрII. Отработка всех промышленных пластов осуществляется механизированным способом – комбайновыми комплексами. Система разработки – камерная, с поддержанием кровли на жестких ленточных целиках [17].

32

#### 1.5 Геологические процессы

Соляная толща Верхнекамского месторождения характеризуется развитием внутрисоляных деформаций меняющейся сложных интенсивности. Внутрисоляными деформациями осложнены, главным образом, только соляные поднятия. В прогибах, соляные отложения в общем залегают сравнительно спокойно. С усложнением общей структуры соляных поднятий становятся сложнее и интенсивнее внутрисоляные деформации в ядрах. Интенсивность и характер внутрисоляных деформаций не остаются постоянными и по разрезу соляной толщи. Выделяется 4 структурных комплекса, разделенных по особенностям внутреннего строения. В сводах поднятий иногда только встречаются небольшие трещины-полости, расположенные согласно слоистости. Секущих открытых трещин в пределах соляных поднятий встречено не было. Внутри соляной толщи выделяются складки: 1) охватывающие годовые прослои внутри слоев и пластов солей, измеряемые сантиметрами или несколькими дециметрами (складки 1-ого порядка); 2) охватывающие отдельные слои и пласты солей с амплитудой до нескольких метров (2-ого порядка); 3) охватывающие серию пластов соляной толщи с амплитудой до нескольких десятков метров (складки 3-его порядка) [11].

Внутрисоляные деформации ВКМС – это типичные деформации течения (нагнетания), созданные результате послойного В неравномерного перераспределения (течения) солей (оттока из одних локальных участков и нагнетания на другие). В результате послойного пластического перераспределения солей созданы и сами соляные структуры месторождения, образуемые соляной толщей в целом. Это те же деформации течения только более крупного масштаба. Послойным течением в основном охвачены калийные соли и зернистая (кристаллически-зернистая) каменная соль. Перистая каменная соль существенным перемещениям внутри слоев не подвергалась.

Наклон или опрокидывание всех складок независимо от их порядка и положения в поднятиях строго на запад, а также аналогичное асимметричное строение самих соляных поднятий – явное, доказательство того, что послойное течение солей на преобладающей площади ВКМС имело одностороннее

направленный характер и происходило в западном направлении. Причиной этого является их гравитационное течение с востока на запад по подсоляному ложу к области максимального прогибания Соликамской впадины при активизирующем влиянии блоковых вертикальных тектонических подвижек подсолевого фундамента.

Всестороннее исследование внутрисоляных деформаций и выявленная генетическая связь их и в целом соляных структур с послойным течением солей дает глубокое представление о тектонической структуре ВКМС – условиях залегания калийных пластов на тех или иных участках.

Прогибы являются зонами оттока и в целом более ослаблены в общей тектонической структуре месторождения. Здесь постоянно действуют локально распределенные тангенциальные растягивающие напряжения, приводящие к появлению локальных ослабленных участков, насыщенных газом.

Поднятия с точки зрения общей устойчивости более благоприятны. Соляные поднятия – это локальные области аккумуляции (нагнетания) солей. Здесь распространены преимущественно сжимающие напряжения, приводящие к упрочнению внутренней структуры пластичных соляных пород, а, следовательно, и к общей устойчивости их в горных выработках [11].

Одним из основных условий безопасного ведения горных работ на рудниках Верхнекамского месторождения является обеспечение целостности водозащитной толщи, под которой понимается необводненная часть горного массива, находящаяся выше верхнего промышленного пласта до кровли верхнего слоя каменной соли. В составе ВЗТ в соответствии с методическими рекомендациями к «Указаниям по защите рудников от затопления...» [18] выделяются три части (Рисунок 5): нижняя (ВЗТ1) представлена чередованием пластов калийно-магниевых солей и каменной соли; средняя (ВЗТ2) сложена ПКС; верхняя (ВЗТ3) представлена переходной пачкой. Наличие в геологическом разрезе ВЗТ1, ВЗТ2 и ВЗТ3 является классификационным признаком строения ВЗТ, позволяющим выделить полный (ВЗТ1+ВЗТ2+ВЗТ3), переходный (ВЗТ1+ВЗТ2+0) и неполный типы разрезов (ВЗТ1+0+0).



Рисунок 5 – Типизация ВЗТ по полноте разреза

 (1 – кровля ВЗТ – поверхность соляного зеркала, 2 – нижний элемент ритмопачек (мергели, глина, ангидриты), 3 – каменная соль, 4 – карналлит, 5 – пестрый сильвинит, 6 – гипергенный сильвинит, 7 – кровля отрабатываемого пласта АБ – подошва ВЗТ) [18]

Горные процессы, происходящие на месторождении постоянно, могут провоцировать опасные геологические явления. В связи с этим, существует необходимость в постоянном контроле за развитием опасных зон с присутствием тектонических дислокаций, для чего и используются геофизические методы, в частности малоглубинная сейсморазведка.

#### ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1

Геологическое строение, Верхнекамского тектоника И литология месторождения солей являются сложными. На этапе эксплуатационной разведки проводится бурение солеразведочных скважин с целью изучения геологического строения. Вокруг ствола пройденной скважины оставляют целики, в пределах которых подземные горные работы не ведутся. Столь редкая сеть разведочных скважин и присутствие зон запрета горных работ приводит к тому, что многие особенности геологического строения промышленных пластов и водозащитной толщи остаются невыявленными. К таким особенностям относятся дизъюнктивные и пликативные тектонические дислокации соляной толщи. На ВКМС геологами встречены следующие нарушения: зоны замещения каменной солью пластов карналлита и сильвинита, одиночные крупные складки и протяженные складчатые области, зоны трещиноватости, разрывные нарушения, области скопления газа и эрозионные врезы, присутствие которых негативно сказывается на безопасности при эксплуатации калийных рудников и может приводить к потере запасов полезного ископаемого.

Детализация геологического строения в межскважинном пространстве остается за геофизическими методами, в частности, на проектируемых к отработке площадях шахтных полей предусматривается проведение опережающих наземных сейсморазведочных работ. Условия для проведения малоглубинной сейсморазведки на ВКМС далеки от идеальных. Сильное затухание высокочастотной составляющей сигнала в верхней части разреза осложняет получение кондиционных материалов, особенно для интервала продуктивного пласта, залегающего на относительно небольшой глубине. Это связано с наличием неконсолидированной толщи грунтов в верхней части разреза, зоны малых скоростей и малоконтрастным, с точки зрения отражающей способности, строением соляной формации.
## ГЛАВА 2. ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛЕВЫХ РАБОТ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ МАЛОГЛУБИННОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

#### 2.1 Анализ технологии полевых работ применяемой в настоящее время

Полевые сейсморазведочные работы на ВКМС в настоящее время выполняются по методике невзрывной малоглубинной сейсморазведки высокого разрешения с использованием интерференционной системы наблюдений [25].

Для возбуждения упругой волны используются источники упругих колебаний двух типов:

механический поверхностный источник, молот массой 45 кг;

импульсный пороховой источник, энергия пороховых газов патрона 12 калибра.

При полевых работах для регистрации сейсмических данных применяется цифровая телеметрическая сейсмостанция в связке с геофонами для регистрации продольных волн GS-20DX. Аппаратура сертифицирована и выпущена в условиях специализированного производства. Система наблюдения используется 64 фланговой переменная, ассиметричная (от до канальная, центральной). Минимальное удаление между ПВ и ППр составляет 8 м, максимальное удаление при фланговой расстановке достигает 504 м, при центральной – 320 м. Шаг между ПВ равен расстоянию между ППр и составляет 8 м. Кратность описанной выше системы наблюдений – 32. При регистрации обычно реализуется подавление поверхностных волн. Для этого применяется группирование сейсмоприемников с количеством приемников в группе равном 5, с шагом элементов группы 4 м, соответственно с базой группирования 16 м.

Описанная выше технология проведения полевых работ и система наблюдений являются обоснованными, и в целом удовлетворяют требованиям, предъявляемым к подобным работам в рассматриваемых геологических условиях [19]. Однако, если частотный диапазон сигнала, генерируемого применяемыми источниками, является вполне приемлемым, то энергии для надежного решения поставленных геологических задач хватает далеко не всегда. На рисунке 6 представлены типичные сейсмограммы ОПВ, полученные с использованием механического поверхностного источника и системы наблюдений описанной выше, на котором видно, насколько отличаются сейсмограммы, находящиеся друг от друга всего в 300 м. На рисунке 66 приведена сейсмограмма, на которой после обработки хорошо различимы отражения на временах t<sub>0</sub>=100–200 мс и t<sub>0</sub>=680–720 мс. На рисунке 6г показана сейсмограмма, находящаяся всего в 300 м от представленной на рисунке 6б, и на ней те же самые отражения уже практически неразличимы. Эта разница вызвана изменением поверхностных условий и изменениями в геологическом строении верхней части разреза. В целом, качество записи оставляет желать лучшего, в том числе из-за наличия техногенного и случайного шума, повторных ударов источника и его недостаточной мощности (Рисунки ба и бв).



Рисунок 6 – Помехи на полевых сейсмограммах по профилю

(а, в – сейсмограммы после амплитудной регулировки, б, г – эти же сейсмограммы после обработки)

На рисунке 7 представлен пример сейсмограмм ОВП, полученных на одном профиле с использованием импульсного порохового источника. Сейсмограммы, находящиеся друг от друга всего в 235 м могут значительно отличаться (Рисунки 7а и 7в). На сейсмограмме, после предварительной обработки (Рисунок 7б) хорошо различимы оси синфазности отраженных волн на временах t<sub>0</sub>=150–550 мс, что соответствует целевому интервалу изучаемого разреза. На сейсмограмме, полученной в 235 м от той, что представлена на рисунке 7б – отражения отсутствуют полностью (Рисунок 7г).

Даже при том, что на части сейсмограмм, полученных с применением механического и импульсного порохового источников можно выделить отражения, отношение сигнал/шум, И качество записи, В целом, является неудовлетворительным. Причина низкого качества записей заключается в недостаточной энергии применяемых в настоящее время источников, техногенные и случайные шумы, которые вносят искажения и в без того слабый сигнал. Исходные материалы подобного качества полностью исключают проведение динамической интерпретации. В нефтяной сейсморазведке, своеобразном эталоне, у которого малоглубинная сейсморазведка позаимствовала все технологические наработки, соотношение сигнал/шум оценивается в двух окнах: на уровне целевого горизонта («сигнал») и до первых вступлений («микросейсмы»). Приемлемым для решения структурных задач является соотношение сигнал/шум не менее 5, для решения динамических задач не менее 10. В малоглубинной сейсморазведке это утверждение особенно актуально, ведь энергии механического и импульсного порохового источников не всегда достаточно даже для регистрации первых вступлений и получения протяженных отражений от наиболее контрастных границ - кровли и подошвы соляной толщи. В таких условиях возможность надежного и повсеместного получения отражений от целевых отражающих границ, которые имеют гораздо меньшую акустическую жесткость, чем кровля и подошва соляной толщи, остается под вопросом [1].



Рисунок 7 – Сейсмограммы, записанные с импульсным пороховым источником на расстоянии 235 м друг от друга (а, в – полевые сейсмограммы после амплитудной

регулировки, б, г – эти же сейсмограммы после первичной обработки)

Акустическая жесткость границы характеризует контрастность акустических свойств контактирующих горных пород. Если акустические свойства (плотность и скорость) граничащих пород близки, то граница между ними будет проявляться в волновом поле очень слабо, что и наблюдается на практике для интервала внутри соляной толщи. Помимо этого, отрицательное влияние на возможность регистрации целевых отражений оказывают и поверхностные условия.

Изучаемый разрез в интервале соляной толщи и глубже является относительно высокоскоростным, крутизна годографов отраженных волн в пределах используемой расстановки очень мала. Это отрицательно сказывается на точности скоростного анализа, и, как следствие, на точности привязки отражающих горизонтов по глубине, при отсутствии привязки к данным АК и ВСП. В работе [6] отмечено, что при прочих равных условиях случайная ошибка оценки V<sub>эф</sub> обратно пропорциональна квадрату длины годографа. Удовлетворительные по точности оценки скоростей можно получить лишь по достаточно протяженным годографам, особенно в условиях высокоскоростного разреза, где отраженные волны имеют сравнительно небольшие приращения времен с увеличением дистанции. Этот вывод справедлив и для определений V<sub>огт</sub> путем подбора по сейсмограммам ОГТ, с помощью регулируемого криволинейного суммирования трасс. Для получения точных оценок эффективных скоростей рекомендуется выполнять «скоростные» зондирования общей глубинной площадки. Для корректной глубинной привязки отражающих горизонтов, помимо «скоростных» зондирований необходимо использовать данные АК и ВСП. В частности, данные АК должны использоваться для сейсмического моделирования и построения трасс однократных отражений.

В качестве примера приведем результаты анализа скоростей по годографу отраженной волны (Рисунок 8), из которого следует, что для одного и того же отражения можно подобрать удовлетворительно совпадающий теоретический годограф со скоростями в интервале от 2500 до 3500 м/с. В глубинном масштабе, это соответствует разбросу возможных оценок положения отражающей границы с 460 до 660 м, и это для самого сильного отражающего горизонта. Для слабых и зашумленных отражений, интерферирующих с другими, как показали наши



Рисунок 8 – Результат скоростного анализа для одних и тех же сейсмограмм (а – скорость по годографу 2500 м/с, б – 3500 м/с. В обоих случаях теоретический годограф удовлетворительно совпадает с осью синфазности отраженной волны)

исследования, этот разброс может быть еще больше. Подобная неоднозначность может привести интерпретатора в заблуждение, например, положение пласта маркирующих глин по результатам интерпретации может оказаться на глубине, соответствующей реальному положению кровли глинисто-ангидритовой толщи.

На регистрируемых сейсмограммах (Рисунок 8) в диапазоне удалений от минус 50 до 50 м в верхней части сейсмограммы ( $t_0=0-150$  мс) и от минус 100 до 100 м в средней ( $t_0=150-500$  мс), регистрируются в основном высокоамплитудные поверхностные волны, которые препятствуют выделению в этом интервале протяженных осей синфазности отраженных волн. Так как основная часть годографов отраженных волн находится на удалениях больше 50–100 м важно соблюдать оптимальную длину регистрирующей линии ППр. Для условий ВКМС при залегании соляной толщи в интервале глубин от 150 до 650 м предлагается использовать расстановку длиной не менее 700 м.

# 2.2 Обоснование использования взрывного источника упругих колебаний при проведении малоглубинной сейсморазведки

Для получения стабильно высокого по качеству материала при малоглубинных сейсморазведочных исследованиях, с целью изучения соляной толщи Верхнекамского месторождения солей, впервые использован взрывной источник упругих колебаний с применением телеметрических регистрирующих систем при использовании современного программного обеспечения.

Для обоснованного выбора веса заряда и глубины его заложения выполнены испытания, в ходе которых записаны сейсмограммы с зарядами, погруженными в скважины глубиной 1,5 м и 4 м (Рисунок 9) и весом 200 г, 600 г и 1000 г (Рисунок 10). Заряды ВВ 100 г и 200 г погружались в отдельные скважины глубиной 1,5 м. Заряд ВВ 1000 г был размещён в пяти скважинах по 200 г в каждой.



Рисунок 9 – Сейсмограммы, записанные при испытании источника с зарядом различного веса на различной глубине (а – 200 г на глубине 4 м, б – 600 г на глубине 4 м, в – 200 г на глубине 1,5 м, г, д, е – амплитудные спектры)



Рисунок 10 – Пример сейсмограмм, записанных с целью выбора веса заряда (а – вес BB 100 г, б – вес BB 200 г, в – вес BB 1000 г)

Как показали результаты экспериментов, значительной разницы в отношении сигнал/шум и амплитудных спектрах на полученных записях не отмечается. Поэтому, для проведения малоглубинных сейсморазведочных исследований со взрывным источником рекомендуется использовать заряды весом 200 г.

Высокая энергия взрыва при использовании взрывного источника может приводить к выходу регистрируемого сигнала за динамический диапазон, в случае некорректного выбора параметров аппаратного усиления. Для предотвращения записи бракованного материала проведены опытные исследования по выбору аппаратного усиления. В результате работ зарегистрирован сигнал на нескольких пунктах возбуждения с усилением 0, 12, 24 и 36 дБ. На рисунке 11 представлены сейсмограммы, записанные с различным усилением.



Рисунок 11 – Пример сейсмограмм, записанных с целью корректировки усиления сигнала (а – полевые сейсмограммы ОПВ в цвете, б – сейсмограммы с предварительной обработкой в серых тонах)

На сейсмограммах общего пункта возбуждения (Рисунок 11) видно, что при усилении 24 дБ и 36 дБ в центральной части сейсмограммы на большом количестве трасс наблюдается выход сигнала за динамический диапазон (Рисунок 12), т.е. нарушается гладкая форма записи, появляются резкие перегибы, срывы и «ступеньки». Эти искажения негативно влияют на форму полезного сигнала, поэтому использование усиления более 12 дБ при весе заряда ВВ 200 г нежелательно.



Рисунок 12 – Пример искажения сигнала при выходе сигнала за динамический диапазон

Результаты исследований, проведенных на разных участках месторождения, указывают на то, что даже использование взрывного источника в некоторых случаях не позволяет получать кондиционный материал в целевом интервале соляной толщи. Это связано с поверхностными условиями, мощностью и строением четвертичных отложений (Q).

Четвертичная система на ВКМС представлена комплексом пород различного генезиса (пески, супеси, суглинки, глины) переменной мощности, находящихся в различные рода соотношениях. Средняя мощность Q по данным выборки из 911 скважин колеблется от 5 до 15 м, повышенная от 15 до 40 м, аномально высокая –

свыше 40 м [17]. Скорость продольной волны в четвертичных отложениях изменяется от 300 до 1500 м/с. В этом интервале возникают высокоамплитудные низкочастотные поверхностные волны, интерферирующие с целевыми отражениями. Эффект интерференции элементарных отражений описан более подробно в результатах сейсмического моделирования [31].

Установлено, что в условиях ВКМС, при погружении зарядов на глубину более 5 м и при нахождении источника в низинах (оврагах, долинах рек и ручьев) качество регистрируемого материала сильно возрастает. На рисунке 13 представлены сейсмограммы, записанные при погружении зарядов на глубину 1,5 м (Рисунок 13а), при этом ПВ находился на линии ППр, и глубину 8,5 м (Рисунок 13б), при расстоянии ПВ 25 м от линии ППр. На исходных полевых сейсмограммах видно, что погружение заряда на глубину 8,5 м благоприятно сказывается на повышении соотношения сигнал/шум на удалениях более 100 м. На исходных полевых сейсмограммах без полосовой фильтрации и амплитудной коррекции проявляются динамически выраженные оси синфазности отраженных волн (Рисунок 13б).

По результатам проведенных опытных работ выявлено, что амплитудно-частотные спектры в центральной части полевых сейсмограмм на удалениях от -100 до 100 м идентичны (Рисунок 13в). На этих удалениях по большей части регистрируются высокоамплитудные поверхностные волны. На удалениях свыше 100 м, где начинают проявляться годографы отраженных волн, разница амплитуд при углублении заряда уже значительна и возрастает в 3–4 раза (Рисунок 13е). Таким образом, увеличение глубины скважины в интервале до выхода из ЗМС слабо влияет на подавление поверхностных волн, но значительно сказывается на энергии, передаваемой в массив.

На рисунках 13г и 13д представлены сейсмограммы с полосовой фильтрацией и амплитудной коррекцией. Анализ представленных сейсмограмм показывает, что количество годографов отраженных волн значительно больше, а оси синфазности более протяженные и динамически выраженные.



Рисунок 13 – Сравнение сейсмограмм при различной глубине скважин под BB (а, г – глубина погружения заряда 1,5 м, скв. под BB находится линии ППр, б, д – глубина погружения заряда 8,5 м, скв. под BB находится на удалении от линии ППр на 25 м, в, е – амплитудно-частотные спектры в указанных окнах для исходных полевых сейсмограмм)

Ниже (Рисунок 14) приведен пример сейсмограмм, находящихся на одном участке с различными высотными отметками пунктов возбуждения. На сейсмограммах видно, что на возвышенностях, где мощность четвертичных отложений наибольшая, оси синфазности менее контрастны (Рисунок 14а), чем на сейсмограммах в низинах и долинах рек (Рисунки 14б и 14в).





Таким образом, наиболее остро стоит вопрос о минимизации влияния верхней части разреза и зоны малых скоростей [20]. Основной выход – погружение зарядов на бо́льшую глубину, либо проведение исследований в низинах и долинах рек, что на практике возможно далеко не всегда. Погружение зарядов на большую глубину с сохранением шага ПВ от 5 до 10 м сильно удорожает работы, а расположение профилей в низинах возможно крайне редко.

С целью сравнения источников упругих колебаний были проведены опытные работы на одном из участков Верхнекамского месторождения солей с использованием импульсного порохового и взрывного источников. В качестве взрывного источника использовалось взрывчатое вещество аммонит бЖВ патронированный весом 200 г с электродетонатором. Заряд погружался на забой скважины глубиной 1,5 м, после чего ствол скважины тампонировался грунтом. В

качестве заряда для импульсного источника использовался патрон 12 калибра, полностью начиненный порохом.

Ниже приведены полевые сейсмограммы (Рисунок 15), записанные на одном пикете, с помощью импульсного порохового (Рисунок 15а) и взрывного (Рисунок 15б) источников упругих колебаний.



Рисунок 15 – Сравнение сейсмограмм, записанных с разными источниками (а, г – сейсмограммы до и после предварительной обработки записанные с импульсным пороховым источником, б, д – сейсмограммы до и после обработки, записанные со взрывным источником, в, е – амплитудно-частотные спектры)

На исходных сейсмограммах видно, что при регистрации с использованием

импульсного порохового источника видимая частота сигнала несколько выше, чем с использованием взрывного. В связи с недостаточной мощностью импульсного порохового источника, в данных поверхностных условиях, первые вступления регистрируются только на 1/3 части длины линии наблюдений, на остальной части расстановки фиксируются только техногенный и случайный шум (микросейсмы). Годографы отраженных волн отсутствуют ПО всей длине записи. Ha сейсмограммах, записанных с использованием взрывного источника хорошо прослеживаются первые вступления по всей длине расстановки. После предварительной обработки, включающей полосовую фильтрацию и амплитудную коррекцию, на записях проявляются протяженные оси синфазности ассоциируемые с отражениями от акустически жестких границ.

Произведем теоретическую оценку энергии взрыва. Удельная энергия взрывного разложения тротила (тринитротолуола) в мировой практике составляет 4184 Дж/г, вес зарядов взрывного источника выберем равным 200 г, тротиловый эквивалент аммонала – 0,99. Таким образом, энергия взрыва в одиночной скважине оценивается в 4184 Дж/г × 200 г × 0,99 = 828 432 Дж. Для сравнения, энергия взрыва 5 г пороха при тротиловом эквиваленте 0,6 составляет: 4 184 Дж/г × 5 г × 0,6 = 12 552 Дж, что в 66 раз меньше энергии взрыва 200 г аммонала. На практике амплитуды регистрируемого сигнала различается меньше (Рисунок 15в).

При ухудшении поверхностных условий (Рисунок 16) отражения полностью пропадают по данным зарегистрированным с применением импульсного порохового источника. По результатам же взрывного источника целевые отражения прослеживаются на всю длину исследуемого профиля. В интервале продуктивной толщи отсутствуют протяженные оси синфазности, что связано с тонкослоистым, малоконтрастным строением (переслаиванием сильвинитов и каменной соли).

Таким образом, по результатам опытных работ установлено, что импульсный пороховой источник можно применять только при крайне благоприятных поверхностных условиях и строении ВЧР, что на ВКМС встречается редко. Для получения материала стабильного качества на различных участках месторождения





вне зависимости от поверхностных условий и строения ВЧР необходимо применять взрывной источник упругих колебаний с погружением зарядов ВВ в скважины. При этом, важную роль в получении исходных данных играет тщательный учет ВЧР (расчет и ввод статических поправок). Для этого требуется высокоточная топографо-геодезическая съемка высотных отметок и координат ПВ, ППр, а также надежная регистрация первых вступлений по всей длине расстановки.

Установлено [35, 36], что группирование зачастую может негативно влиять на регистрируемый сигнал, а именно: сужать частотный диапазон и снижать

эффективность подавления помех из-за использования идентичных параметров группирования для различных участков. Для каждого участка с более или менее выдержанным рельефом необходимо проведение опытных работ по выбору параметров группы (размеров, ориентации и шага между датчиками), иначе велика вероятность получения неудовлетворительного результата только за счет некорректных параметров группирования.

Для негативного снижения влияния группирования предлагается использовать одиночные сейсмоприемники, что позволит сохранить максимально широкий частотный диапазон регистрируемого сигнала. Снижение чувствительности одиночных геофонов по сравнению с группой можно компенсировать применением более чувствительных приемников, например, GS-ONE, чувствительность которых в 3 раза выше, чем применяемых в настоящее время GS-20DX. При этом, для расширения возможностей по подавлению поверхностных волн необходимо уменьшить шаг ППр от 2 до 5 м, в зависимости от технико-экономических условий проведения сейсморазведочных работ.

## ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

Полевые сейсморазведочные работы на Верхнекамском месторождении солей в настоящее время выполняются по методике невзрывной малоглубинной сейсморазведки высокого разрешения с использованием интерференционной системы наблюдения. Для возбуждения упругих волн обычно используются источники колебаний двух типов: механический и импульсный пороховой. В целом, применяемая в настоящее время система наблюдений является обоснованной и удовлетворяет требованиям, предъявляемым к работам подобного типа в рассматриваемых геологических условиях. Однако, если частотный диапазон источников можно считать достаточным, то их мощности для надежного решения геологических задач недостаточно.

В рамках проведенных исследований автором диссертации предложено и обосновано использование взрывного источника упругих колебаний. Результаты, полученные в ходе опытных полевых работ, указывают на значительный прирост энергии отражений от кровли и подошвы соляной толщи, что в свою очередь влияет на точность скоростного анализа и как следствие – глубинной привязки горизонтов. Помимо этого, соотношение сигнал/шум у взрывного источника в разы выше чем у импульсного порохового, что позволяет получить надежный для интерпретации материал.

Таким образом, по результатам исследований, проведенных в рамках диссертации сформулировано 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». Для детального анализа регистрируемого волнового поля (выделения контрастных отражающих границ и нарушений, влияния волн-помех) автором проведено сейсмическое моделирование с использованием тонкослоистых геолого-геофизических моделей, построенных по данным акустического каротажа.

# ГЛАВА 3. ТОНКОСЛОИСТАЯ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СРЕДЫ

Геофизические, в том числе и сейсморазведочные исследования на Верхнекамском месторождении солей ведутся в сложных геологических условиях, при которых выяснить природу аномалий волнового поля и их связь с особенностями геологического строения водозащитной толщи прямыми методами (бурением, проходкой горных выработок) удается в редких случаях. В такой ситуации выполнить обоснование методик обработки и интерпретации, а также оценить корректность получаемых результатов, возможно только на основе решения прямой задачи сейсморазведки или, иначе говоря, сейсмического моделирования, т.е. прямого сравнения данных моделирования и результатов полевых работ [7, 12, 15, 24, 28].

Сейсмогеологическая модель представляет собой геологический разрез в виде распределения в пространстве физических свойств, определяющих распространение упругих колебаний с известными параметрами источника генерируемого сигнала. Составными частями модели являются сейсмические слои, которые соответствуют различным по масштабу структурно-литологическим подразделениям геологического разреза. В пределах слоя физические свойства постоянны – однородные слои. В зависимости от вертикального масштаба отдельных слоев, при разбиении модели упругих свойств, различают толстослоистые и тонкослоистые модели геологической среды.

До настоящего времени в качестве решения волнового уравнения на ВКМС использовался лучевой метод [2, 22], наиболее просто описывающий распространение луча в среде и основанный на его оптическом распространении, без учета дисперсии, конверсии типов волн, интерференции, многократных отражений, влияния углов падения на коэффициент отражения и при отдельном расчете продольных и поперечных волн. Такой подход может использоваться только для экспресс-оценки простых толстослоистых сред.

Реальные геологические среды, особенно осадочная толща, являются, как

правило, тонкослоистыми. Согласно данным акустического каротажа, скорости волн во внутренних точках разреза не остаются постоянными даже на интервалах в доли метра. Столь частые вертикальные изменения скорости отдельно не проявляются в поле регистрируемых с поверхности отраженных волн. В соответствии с теоретическими расчетам, минимальная мощность выделения отдельных слоев при проведении поверхностной сейсморазведки, отражение от которых имеет достаточную интенсивность в спектре регистрируемых колебаний, составляет около четверти длины волны, которая составляет несколько десятков метров.

Результатом сейсмического моделирования является синтетическая волновая картина, позволяющая определить состояние и условия предположительного залегания горных пород. Точность этой информации влияет на все аспекты сейсморазведочных работ. На сегодняшний день вычислительная техника достигла высоких мощностей, позволяющих перейти от упрощенных одномерных способов расчета волновых полей к двумерным и трехмерным методам, максимально учитывающим существующие эффекты распространения волн.

Соляная толща ВКМС является тонкослоистой, мощность прослоев меняется от первых сантиметров до десятков метров, поэтому возникает вопрос о степени упрощения геолого-геофизической модели, которую можно допустить при расчете волнового поля.

B качестве инструмента для решения прямой задачи В рамках диссертационной работы автором выбрано конечно-разностное численное моделирование, которое позволяет точно имитировать все сейсмические эффекты прохождения волнового поля для мультипараметрической, гетерогенной и геологически реалистичной модели среды. Точность моделирования ограничивается сложностью использованного дифференциального только приближения волнового уравнения и техническим совершенством применяемых схем расчета. Моделирование выполнено в программном комплексе Tesseral Pro, пакет осуществлять моделирование полного сейсмического позволяет (акустического) поля [40].

Моделирование на основе упругого волнового уравнения является самым исследований, создающим наиболее близкую полным инструментом аппроксимацию волнового поля к реальным условиям твердой среды, включая эффекты обмена и волны сдвига. Возможности пакета Tesseral Pro полностью удовлетворяют требованиям, возникающим рамках сейсмического В моделирования для целей изучения ВКМС. Из широкого спектра возможностей этого пакета для выполнения исследований использовались оценка разрешающей способности сейсморазведки для сложной геологии моделирование И сейсмических записей для поверхностных наблюдений.

## 3.1 Обоснование параметров сейсмического моделирования

Для корректного расчета синтетического поля и соответствия его наблюденному на месторождении необходимо точно подобрать параметры построения модели и параметры решения волнового уравнения. Обоснованная геолого-геофизическая модель среды позволяет определить оптимальные параметры системы наблюдений при планировании сейсморазведочных работ на новых участках и определить целесообразность проведения сейсморазведки для решения тех или иных задач. Целью исследований по выбору параметров сейсмического моделирования является определение степени детализации модели среды и способа решения прямой задачи для условий ВКМС при существующих на сегодня вычислительных мощностях и программных возможностях.

Перед этапом сейсмического моделирования автором были проведены исследования ПО обоснованию параметров моделирования, при которых наблюдений, использовалась система ЧТО при реальных полевых И сейсморазведочных работах МОВ МОГТ на ВКМС. Источник упругих колебаний представлен В виде точечного объекта, центральная частота сигнала идеализирована и составляет 100 Гц (ширина спектра 200 Гц, соответственно). Выбор частоты очень важен, так как именно от этого параметра напрямую зависит разрешающая способность.

Разрешающая способность сейсморазведки при изучении слоистых сред

характеризуется степенью детальности, с которой может быть произведено расчленение геологического разреза, она определяется как минимальное расстояние между двумя объектами (например, границами, соответствующими кровле и подошве пласта), на котором они еще различимы как два разных объекта, а не сливаются в один [4, 5].

Вертикальная разрешающая способность рассчитывается на основе уравнения Вайдса:

$$R_{\rm B} = \lambda /_{4}; \tag{1}$$

$$\lambda = V_{\Pi \Lambda} / f, \tag{2}$$

где  $R_{\rm B}$  – вертикальные размеры выделяемого в сейсмических записях объекта,  $\lambda$  – длина волны,  $V_{\rm пл}$  – пластовая скорость, f – преобладающая частота импульса.

Горизонтальная разрешающая способность рассчитывается по формуле:

$$R_{\Gamma} = \frac{1}{4} d\Phi = \frac{1}{4} \sqrt{2\lambda H + \frac{\lambda^2}{4}} = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{2V_{\Pi \pi}H}{f} + \frac{(V_{\Pi \pi}/f)^2}{4}},$$
 (3)

где  $R_{\Gamma}$  – латеральные размеры выделяемого в сейсмических записях объекта,  $d\Phi$  – диаметр зоны Френеля,  $\lambda$  - длина волны, H – глубина залегания объекта,  $V_{nn}$  – пластовая скорость, f – преобладающая частота импульса.

Анализ полевых материалов показывает, что частота сигнала при наземных сейсморазведочных исследованиях не превышает 100 Гц. При идеальных условиях с преобладающей частотой f = 100 Гц,  $V_{пл} = 3000$  и 4000 м/с, глубине H = 300 м, вертикальная разрешающая способность будет изменяться в интервале от 7,5 до 10 м, а горизонтальная от 33,75 до 39 м. В реальных условиях преобладающая частота в среднем 60 Гц, поэтому разрешающая способность изменяется в пределах: вертикальная от 12,5 до 16,7 м, горизонтальная от 43,7 до 50,7 м.

Таким образом, решение прямой задачи для моделей с мощностью слоев более 12,5–16,7 м может ввести исследователя в заблуждение о возможностях метода в плане структурных построений и при выявлении локальных неоднородностей в среде. Результат таких расчетов будет далек от реальной ситуации, поскольку в тонкослоистой среде появляется эффект интерференции, который не возникает в толстослоистых средах. В реальности же, интерференция сильно осложняет волновую картину и затрудняет процесс обработки и интерпретации. Помимо интерференции, в рассматриваемых геологических условиях присутствуют эффекты дисперсии, конверсии типов волн, а также осложнение волновой картины за счет поверхностных и кратных волн.

Основные параметры расчетов приняты такими (по порядку задания в пакете моделирования Tesseral Pro):

– параметры модели: длина модели 2 км, максимальная глубина 500 м;

– детальность разбиения слоев – 1 м (для тонкослоистой модели), 15–210 м (для толстослоистых моделей);

- источник колебаний – всесторонне-направленный (сферический);

– шаг пунктов возбуждения – 8 м;

– сигнал – импульс Риккера типа Single (простой), с пиковой частотой 100 Гц, ширина спектра 200 Гц;

– шаг пунктов приема – 8 м;

 общая длина профиля возбуждения и регистрации – 504 м, размещен по центру модели для исключения влияния краевых эффектов;

– шаг дискретизации – 0,5 мс;

– длина записи – 640 мс.

В рамках предварительных исследований по выбору параметров моделирования автором рассчитано десять горизонтально-слоистых моделей с разной мощностью слоев, из них можно выделить три наиболее показательных.

Модель №1 (Рисунок 17а) – самое упрощенное представление геологической среды на ВКМС, состоит из мощной толщи осадочных пород верхней части разреза, включающей пласты четвертичной системы (Q), пестроцетной толщи (ПЦТ), терригенно-карбонатной толщи (ТКТ), объединённых в одну толщу, которая покрывает пласты соляной толщи (СМТ, ПКС, КЗ, СЗ) и слой маркирующих глин (МГ), являющийся маркером, присутствующий практически на всем Верхнекамском месторождении. Мощность пластов изменяется от 25 до 210 м (за исключением слоя МГ), средняя мощность пластов 70 метров.





в – участок временного разреза)

При слабой вычислительной мощности данная модель может дать самое грубое представление о структуре волнового поля в рассматриваемых геологических условиях. На сейсмограммах (Рисунок 17б) хорошо различимы отражения от основных границ и поверхностная волна, которая ухудшает качество получаемого материала. Отметим, что явление интерференции при распространении волны в данной модели проявляется слабо. На участке временного разреза (Рисунок 17в) видно, что все оси синфазности хорошо увязываются с литологическими границами, заданными при моделировании. Поверхностная волна носит упрощенный характер, далекий от реального.

Модель №2 (Рисунок 18а) – усложненная модель среды, по сравнению с моделью №1, путем разделения Q, ПЦТ и ТКТ на отдельные толщи, с добавлением пластов «первая соль» и ПдКС. Модель может дать понимание об основных отражающих границах на ВКМС, разделяющих геологические пласты по литологии.



Рисунок 18 – Результаты моделирования на основе толстослоистой модели среды (а – модель геологической среды, б – пример синтетической сейсмограммы,

в – участок временного разреза)

Мощность пластов изменяется от 10 до 150 метров. На сейсмограмме (Рисунок 18б) основные заложенные в модель отражающие границы прослеживаются плохо. На качество сильно влияет присутствие поверхностных волн, многократных отражений и интерференция волн. На участке временного разреза (Рисунок 18в) количество кажущихся осей синфазности отраженных волн в разы больше чем заложено в модели, этот факт говорит о присутствии многократных отражений.

Модель №3 (Рисунок 19а) – тонкослоистая модель, наиболее точное приближение к реальной геологической среде, построена по данным АК с шагом разбиения 1 м. Шаг является оптимальным как с точки зрения детальности, так и с точки зрения времени расчетов. При необходимости, модель может быть разбита на пропластки до 0,1 м. Модель позволяет учесть практически все значимые физические явления, происходящие с упругой волной в геологической среде. На сейсмограмме (Рисунок 19б) без обработки сложно определить каким пластам соответствуют выделяемые оси синфазности, присутствует полный набор эффектов, негативно влияющих на качество материала.



Рисунок 19 – Результаты моделирования на основе тонкослоистой модели среды (а – модель геологической среды, б – пример синтетической сейсмограммы, в – участок временного разреза)

Полученные синтетические сейсмограммы сравнивались с реальными полевыми записями, записанными на ВКМС, по следующим параметрам:

- максимальная видимая частота по сейсмограммам ОПВ;
- амплитуды и частоты исходного сигнала;
- наличие осей синфазности отраженных волн;
- интерференция упругих волн на сейсмических записях;
- присутствие негативных эффектов распространения волны и помех.

Ниже представлена сейсмограмма, полученная в результате решения прямой задачи (Рисунок 20а) и зарегистрированная в ходе выполнения полевых работ (Рисунок 20в), а также спектры этих сейсмограмм (Рисунок 20б, 20г). Представленные сейсмограммы получены в результате предварительной обработки (частотная фильтрация и амплитудная коррекция). Ширина спектра составляет порядка 150–200 Гц, форма частотных спектров в целом идентична. На сейсмограммах, полученных в результате моделирования присутствуют эффекты интерференции, многократные отражения от акустически жестких границ и поверхностные волны.

На синтетической сейсмограмме (Рисунок 20а) отмечается большое количество осей синфазности с равномерным вертикальным шагом. Вероятнее всего, эти оси возникают не только от границ, попадающих в пределы разрешающей способности, не менее чем через 16,7 м, но и в результате многократных отражений.





Проведенные исследования по обоснованию модели для решения прямой задачи сейсморазведки МОВ МОГТ показали, что тонкослоистая модель №3 наиболее объективно отражает процесс распространения упругой волны в реальной геологической среде и позволяет учесть все значимые физические явления, происходящие с волной. Моделирование для условий ВКМС необходимо выполнять на основе решения упругого волнового уравнения для тонкослоистых моделей, максимально приближенных к строению изучаемой среды. Такой подход обеспечит максимальное приближение теоретического (рассчитываемого) волнового поля к фактическому (регистрируемого), и, как следствие, повысит объективность получаемых результатов [31].

#### 3.2 Исходные данные для сейсмического моделирования

Для наиболее точного представления о характере изменений волнового поля на территории Верхнекамского месторождения солей необходимо построить и рассчитать модели, характерные для разных участков, с присущими для них геологическими особенностями залегания пластов солей. Для этого, на выбранных участках должны присутствовать не только данные бурения солеразведочных скважин, но и материалы ГИС.

На лицензионных участках Верхнекамского месторождения солей акустический каротаж проводится с целью выделения интервалов трещиноватости и определения физико-механических свойств горных пород по скорости прохождения и затухания акустического сигнала. Снижение значений скоростей может быть обусловлено трещиноватостью, литологическим замещением более слабыми породами, тектоническими нарушениями, структурно-литологическими нарушениями. В частности, слабые по прочности глинистые прослои отмечаются пониженными скоростями.

Наиболее свежие скважинные данные присутствуют по Романовскому (юго-восточная часть месторождения), Быгельско-Троицкому (северо-восточная часть шахтного поля БКПРУ-4) и Соликамскому (южная часть шахтного поля СКРУ-2) участкам. Работа с архивными данными проводилась в программе «Геоконструктор» (GCClient, правообладатель ПАО «Уралкалий», разработчик ООО «Информ++»), которая является базой данных всех скважин месторождения. При выборке по дате и по лицензионным участкам был определен ряд скважин, содержащих данные ГИС. Для проведения сейсмического моделирования автором выбраны скважины 2004, 2005 (южная часть Романовского участка), 1108, 1109, 1110, 1111 (северо-восточная часть Быгельско-Троицкого участка), 635/1 (южная часть Соликамского участка).

### 3.3 Технология сейсмического моделирования

На первом этапе моделирование проведено с использованием поверхностного источника, имитирующего распространение плоской волны в

среде, что позволило дать экспресс-оценку получаемых синтетических материалов.

На втором этапе проведено моделирование с точечным источником сферической волны для более сложных моделей, чем на первом этапе. Моделирование с использованием сферического источника позволило получить отдельные синтетические сейсмограммы общего пункта возбуждения. Полученные в программе моделирования сейсмограммы экспортировались в сейсмический файл формата SEG-Y. Сейсмическим трассам присваивалась геометрия и производилась обработка в программе RadExPro. Результатом обработки являлись временные разрезы [37]. Такой подход несколько усложняет процесс получения результатов, но максимально приближен к реальной ситуации. Помимо этого, появляется возможность оценить влияние процедур обработки на результирующее волновое поле.

Всего на первом этапе автором построено 74 тонкослоистых модели среды с присутствием нарушений геологического строения соляной толщи ВКМС разных размеров, а именно: зоны замещения, зоны складчатости, разрывные нарушения, зоны дробления, зоны трещиноватости.

Основные параметры расчетов в программе Tesseral Pro при моделировании плоской волны (по порядку задания):

– параметры модели: длина 1 км, максимальная глубина 500 м;

– детальность разбиения слоев – 1 м;

– источник колебаний – поверхностный плоской волны;

– сигнал – импульс Риккера типа Single (простой), с пиковой частотой 100 Гц, ширина спектра 200 Гц;

– шаг пунктов приема – 10 м;

 общая длина профиля возбуждения и регистрации – 1000 м, размещен по центру модели для исключения влияния краевых эффектов;

– шаг дискретизации – 0,5 мс;

– длина записи – 1000 мс.

При построении тонкослоистых моделей использовались данные акустического каротажа по скважинам на участках с типичным для месторождения

залеганием соляных пластов. Дискретность разбиения на слои составляет не более 1 м, что примерно на порядок детальнее разрешающей способности наземной сейсморазведки. Все модели являются идеализированными, поскольку фоновое строение – горизонтально-слоистое, форма неоднородностей – симметричная, верхняя часть разреза представлена в виде низких значений скоростей.

Ниже приведены примеры тонкослоистых моделей для трех основных нарушений, построенных на основе результатов акустического каротажа. На рисунке 21 представлена тонкослоистая модель участка ВКМС с присутствием разрывного нарушения по всей соляной толще с амплитудой смещения 20 м и углом наклона 50°.





Разрывное нарушение представлено разрывом в соляной толще со смещением сплошности геологических границ под определённым углом, имеет региональный характер, залегает на глубине от 270 до 500 метров.

На рисунке 22 представлены примеры тонкослоистой ГСМ с присутствием четырех зон замещения, с различными горизонтальными размерами – 50, 100, 150 и 200 м, при одинаковых вертикальных размерах – 10 м.





Зона замещения представлена на сейсмогеологическом разрезе четырьмя областями со сменой интервальных скоростей, на глубине 340 м в пределах соляной толщи. В реальных условиях, как правило, замещению подвергаются породы сильвинитовой и карналлитовой пачки, каменной солью. Замещение характеризуется сменой цикла напластования, с заменой одного пласта (с резким выклиниванием или обрывом) на другой, в результате геологических процессов, происходивших в процессе формирования месторождения.

На рисунке 23 представлена модель геологической среды с присутствием зоны складчатости протяженностью 500 м от начала профиля с размерами складок: вертикальный – 10 м, горизонтальный – 50 м.



Рисунок 23 – Пример тонкослоистой сейсмогеологической модели с присутствием геологической неоднородности (зона складчатости, вертикальный размер складок 10 м, горизонтальный – 50 м)

Крупная складчатость на ВКМС встречается довольно часто, особенно в карналлитовой пачке, реже в покровной каменной соли и сильвинитовой пачке. На сейсмогеологической модели представлена складчатость протяженностью 500 м с одинаковыми размерами одиночных складок. Модель складчатости приближена к той, что наблюдается на месторождении.

Часть расчетов сделана для неоднородностей в двухслойной среде с присутствием одиночных антиклинальных и синклинальных складок. Общий список неоднородностей, для которых геологических построены сейсмогеологические модели и рассчитано теоретическое волновое поле приведен таблице 1. Дислокации, заложенные В В моделях, отличаются как горизонтальными, так и вертикальными размерами. Некоторые модели имеют наклон. Автором рассмотрено большинство геологических нарушений, описанных геологами ВКМС [3, 8, 11, 17].

N⁰	Тип неоднородности, параметры	N⁰	Гориз.	Верт.	Наклон, °
п/п	модели	$\Pi/\Pi$	размер, м	размер, м	
1	Зона замещения	1	50(1)	1 <sup>(2)</sup>	0
	продуктивного пласта	2	100 <sup>(1)</sup>	1 <sup>(2)</sup>	0
	каменной солью	3	150 <sup>(1)</sup>	1 <sup>(2)</sup>	0
	Длина в разрезе – <sup>(1)</sup>	4	200(1)	1 <sup>(2)</sup>	0
	Мощность замещенного	5	50 <sup>(1)</sup>	2,5 <sup>(2)</sup>	0
	пласта – (2)	6	100 <sup>(1)</sup>	2,5 <sup>(2)</sup>	0
	Залегание – горизонтальное	7	150(1)	2,5 <sup>(2)</sup>	0
		8	200(1)	2,5 <sup>(2)</sup>	0
		9	50 <sup>(1)</sup>	5 <sup>(2)</sup>	0
		10	100 <sup>(1)</sup>	5 <sup>(2)</sup>	0
		11	150 <sup>(1)</sup>	5 <sup>(2)</sup>	0
		12	200(1)	5(2)	0
		13	50(1)	10 <sup>(2)</sup>	0
		14	100(1)	10 <sup>(2)</sup>	0
		15	150(1)	10 <sup>(2)</sup>	0
		16	200(1)	10 <sup>(2)</sup>	0
		17	50(1)	20 <sup>(2)</sup>	0
		18	100 <sup>(1)</sup>	20 <sup>(2)</sup>	0
		19	150 <sup>(1)</sup>	20 <sup>(2)</sup>	0
		20	200(1)	20(2)	0
		21	50(1)	40(2)	0
		22	100(1)	40(2)	0
		23	150 <sup>(1)</sup>	40 <sup>(2)</sup>	0
		24	200(1)	40 <sup>(2)</sup>	0
2	Зона складчатости	25	10 <sup>(1)</sup>	5 <sup>(2)</sup>	45
	(чередование складок)	26	20(1)	5 <sup>(2)</sup>	27
	Длина зоны складчатости – 500 м	27	40(1)	5(2)	14
	Ширина отдельной складки – <sup>(1)</sup>	28	100(1)	5(2)	6
	Амплитуда отдельной складки – <sup>(2)</sup>	29	10 <sup>(1)</sup>	10 <sup>(2)</sup>	63
	Угол падения крыльев	30	20 <sup>(1)</sup>	10 <sup>(2)</sup>	45
		31	50 <sup>(1)</sup>	10 <sup>(2)</sup>	22
		32	100 <sup>(1)</sup>	10 <sup>(2)</sup>	11
		33	20 <sup>(1)</sup>	20 <sup>(2)</sup>	8
		34	50(1)	20 <sup>(2)</sup>	63
		35	100(1)	20 <sup>(2)</sup>	39
		36	150 <sup>(1)</sup>	20 <sup>(2)</sup>	22
		37	200 <sup>(1)</sup>	20 <sup>(2)</sup>	15
		38	40 <sup>(1)</sup>	40 <sup>(2)</sup>	11
		39	75 <sup>(1)</sup>	40 <sup>(2)</sup>	63
		40	100(1)	40 <sup>(2)</sup>	47
		41	150(1)	40 <sup>(2)</sup>	39
		42	200(1)	40 <sup>(2)</sup>	28
3	Симметричная	43	10(1)	5(2)	45
	антиклинальная складка	44	20(1)	5(2)	27
	(двухслойная среда)	45	40(1)	5 <sup>(2)</sup>	14
	Ширина – <sup>(1)</sup>	46	80(1)	5(2)	7

T C 1	TT	U		v
	- Leneueur	молепеи	геопогицеских	uanvilleuuu
гаолица г		моделен	I COJIOI H I COMIA	парушении
1	1	, ,		1 2

N⁰	Тип неоднородности, параметры	N⁰	Гориз.	Верт.	Наклон, °
п/п	модели	п/п	размер, м	размер, м	
	Амплитуда – <sup>(2)</sup>	47	10 <sup>(1)</sup>	10 <sup>(2)</sup>	63
	Угол падения крыльев	48	20(1)	10 <sup>(2)</sup>	45
		49	40(1)	10 <sup>(2)</sup>	27
		50	80(1)	10 <sup>(2)</sup>	14
		51	10 <sup>(1)</sup>	20 <sup>(2)</sup>	76
		52	20(1)	20 <sup>(2)</sup>	63
		53	40 <sup>(1)</sup>	20 <sup>(2)</sup>	45
		54	80(1)	20 <sup>(2)</sup>	27
		55	160(1)	20(2)	14
	Симметричная синклинальная складка	56	10(1)	10 <sup>(2)</sup>	63
	(двухслойная среда)	57	20(1)	10 <sup>(2)</sup>	45
4	Ширина – (1)		40(1)	10 <sup>(2)</sup>	27
	Амплитуда – <sup>(2)</sup> Угол падения крыльев	59	80 <sup>(1)</sup>	10 <sup>(2)</sup>	14
		60	2,5 <sup>(1)</sup>	5 <sup>(2)</sup>	63
	Флексурная складка	61	5 <sup>(1)</sup>	10 <sup>(2)</sup>	63
5	Ширина крыла в плане – $(1)$		10 <sup>(1)</sup>	20 <sup>(2)</sup>	63
	Амплитуда – <sup>(2)</sup> Угол падения крыла	63	15(1)	30(2)	63
		64	15(1)	40 <sup>(2)</sup>	69
6	Зона трещиноватости (модуль трещиноватости 0,2 м <sup>-1</sup> , длина отдельных трещин в разрезе 10- 15 мс раскрытием до 1 м).	65	100 <sup>(1)</sup>	20 <sup>(2)</sup>	90
		66	130 <sup>(1)</sup>	20 <sup>(2)</sup>	45
	Длина зоны в разрезе – <sup>(1)</sup> Ширина зоны в разрезе – <sup>(2)</sup> Угол падения зоны	67	200 <sup>(1)</sup>	20 <sup>(2)</sup>	0
7		68	-	20(1)	90
	Разрывное нарушение	69	-	20(1)	50
	Амплитуда смещения пластов – (1)	70	-	40(1)	90
	Угол падения сместителя		-	40 <sup>(1)</sup>	50
		72	_	40(1)	17
8	Зона дробления Длина зоны в разрезе – <sup>(1)</sup>	73	860 <sup>(1)</sup>	40 <sup>(2)</sup>	17
	Ширина зоны в разрезе – <sup>(2)</sup> Угол паления зоны		260 <sup>(1)</sup>	40 <sup>(2)</sup>	50

По результатам сейсмического моделирования получены временные разрезы (Рисунок 24), которые позволяют выполнить анализ и являются исходными данными для проведения динамической интерпретации.



Рисунок 24 – Пример синтетических разрезов для сейсмогеологической модели разрывного нарушения с амплитудой смещения 20 м, наклоном 50° (а – исходный разрез, б – разрез после амплитудной регулировки в узком окне (25 мс))

Общая черта всех синтетических временных разрезов – слабые отражения, либо их отсутствие, в интервале от кровли ПП до МГ, вероятно, по причине слабой контрастности упругих свойств солей. Заложенные нарушения проявляются весьма нечетко, ввиду сопоставимости их размеров с длиной волны.

Поскольку расчеты выполнены для неоднородностей, «фоном» для которых является горизонтально-слоистая среда, на применимость результатов атрибутного анализа таких моделей накладываются определенные ограничения. Однако, иного пути для разработки хоть сколько-то объективного и обоснованного подхода к интерпретации в имеющихся геологических и технико-экономических условиях на данный момент не существует. По крайней мере, результаты применения этой методики практически не зависят от субъекта интерпретации, и в любой момент она может быть скорректирована с учетом вновь поступающей информации. Все построенные модели в рамках первого этапа представлены в приложении А.
На втором этапе моделирования, рассмотрены модели для решения прямой задачи с использованием точечного поверхностного источника сферической волны, погруженного на глубину 10 м. Погружение источника необходимо для частичного уменьшения интенсивности поверхностных волн.

Основные параметры расчетов в программе Tesseral Pro при моделировании сферической волны (по порядку задания):

– параметры модели: длина 2 км, максимальная глубина 750 м;

– детальность разбиения слоев – 0,1 м;

источник колебаний – всесторонне-направленный (сферический);

– шаг пунктов возбуждения – 10 м;

– сигнал – импульс Риккера типа Single (простой), с пиковой частотой 60 Гц, ширина спектра 120 Гц;

– шаг пунктов приема – 5 м;

 общая длина профиля возбуждения и регистрации – 1000 м, размещен по центру модели для исключения влияния краевых эффектов;

– шаг дискретизации – 0,5 мс;

– длина записи – 1024 мс.

На начальном этапе моделирования была построена базовая горизонтально-слоистая модель геологической среды по данным АК до глубины 750 м, после построения которой, геологическим границам задавался наклон с целью их более корректного разделения на синтетических сейсмограммах (Рисунок 25).



Рисунок 25 – Детальная тонкослоистая модель ВКМС по данным акустического каротажа с дискретностью разбиения 0,1 м

После базовой построения тонкослоистой модели интервал, В соответствующий карналлитовым пластам, закладывались нарушения геологического строения, а именно – зоны интенсивной складчатости. Причиной, по которой был выбран этот тип неоднородности стал результат моделирования по первому этапу исследований, по результатам которого атрибутный анализ позволил устойчиво обнаружить протяжённые зоны складчатости.

На рисунке 26 представлен пример антиклинальной тонкослоистой модели Верхнекамского месторождения солей, в которой присутствует зона складчатости по карналлитовому пласту с горизонтальными размерами складок 5 м, вертикальными – 10 м.



Рисунок 26 – Тонкослоистая модель ВКМС с присутствием зоны интенсивной складчатости по карналлитовому пласту (L=5 м, H=10 м)

На рисунке 27 представлен пример антиклинальной тонкослоистой модели ВКМС, в которой присутствует зона складчатости по карналлитовому пласту с горизонтальными размерами отдельных складок 30 м, вертикальными – 30 м.



Рисунок 27 – Тонкослоистая модель ВКМС с присутствием зоны интенсивной складчатости по карналлитовому пласту (L=30 м, H=30 м)

На рисунке 28 представлена антиклинальная тонкослоистая модель ВКМС, в которой присутствует зона складчатости по карналлитовому пласту с



горизонтальными размерами складок 50 м, вертикальными – 10 м.

Рисунок 28 – Тонкослоистая модель с присутствием зоны интенсивной складчатости по карналлитовому пласту (L=50 м, H=10 м)

На рисунке 29 представлена антиклинальная модель ВКМС, в которой присутствует зона интенсивной складчатости по карналлитовому пласту с горизонтальными размерами складок 15 м, вертикальными – 30 м. Подобная складчатость впервые обнаружена по результатам шахтной сейсморазведки способом на поперечных волнах с разделением отражений (ПВРО) [13, 21, 29].



Рисунок 29 – Тонкослоистая модель с присутствием зоны интенсивной складчатости по карналлитовому пласту (L=15 м, H=30 м)

На рисунке 30 представлена антиклинальная модель ВКМС, в которой присутствует зона складчатости по карналлитовому пласту с горизонтальными размерами складок 50 м, вертикальными – 50 м.



Рисунок 30 – Тонкослоистая модель с присутствием зоны интенсивной складчатости по карналлитовому пласту (L=50 м, H=50 м)

На рисунке 31 представлена тонкослоистая антиклинальная модель ВКМС, в которой присутствует зона складчатости по карналлитовому пласту с горизонтальными размерами складок 100 м, вертикальными – 150 м.



Рисунок 31 – Тонкослоистая модель с присутствием зоны интенсивной складчатости по карналлитовому пласту (L=100 м, H=150 м)

Складчатость, заложенная в тонкослоистых моделях, представленных на рисунках 30 и 31 имеют достаточно крупный размер отдельных складок и ранее не встречались на месторождении, модели созданы исключительно для обоснования связи размеров неоднородностей с изменениями, происходящими в волновом поле.

SOU\_X, M 1020 OFFSET, M -500 -400 -300 -200 -100 100 200 300 400 A(%) 75-f (Hz) t, MC

В результате проведенного конечно-разностного моделирования, получены синтетические сейсмограммы общего пункта возбуждения (Рисунок 32).

Рисунок 32 – Пример исходной синтетической сейсмограммы и ее частотный спектр

Поверхностные и отраженные волны имеют близкий частотный диапазон, поэтому при обработке их очень сложно отфильтровать. В результате обработки (Рисунок 33) получена сложная интерференционная картина, на которой присутствуют динамически выраженные годографы отраженных волн и артефакты, оставшиеся после фильтрации поверхностных волн.



Рисунок 33 – Пример обработанной синтетической сейсмограммы и ее частотный спектр

После обработки синтетические сейсмограммы суммировались, в результате чего получены синтетические временные разрезы (Рисунок 34), которые отражают особенности, заложенные в модели и реакцию волновой картины на присутствие тектонических дислокаций. На разрезах присутствуют эффекты дисперсии и конверсии волн, многократные отражения и интерференция элементарных отражений. Помимо этого, соляная толща представляет собой переслаивание близких по физико-механическим свойствам соляных пород, что негативно влияет на коэффициенты отражения границ внутри соляной толщи.

Все вышеописанные факты требуют кропотливого подхода в процессе обработки сейсморазведочных материалов. Для условий сложной волновой картины автором разработана технология обработки, основанная на графе, минимально искажающем исходное волновое поле.





4800 V, м/с

Н, м

2000 Х, м

кривая акустического каротажа

#### ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

Проведены обоснованию выбора параметров исследования по моделирования, позволяющих приблизиться к реальным геологическим условиям месторождения [31, 33]. Установлено, что тонкослоистая модель, построенная по данным акустического каротажа с шагом разбиения модели 1 м, является наиболее приближением к реальной геологической среде. Шаг точным является оптимальным как с точки зрения детальности, так и с точки зрения времени расчетов. При необходимости, модель может быть разбита на пласты мощностью до 0,1 м. Предлагаемая автором тонкослоистая сейсмогеологическая модель Верхнекамского месторождения солей позволяет учесть все значимые физические явления, происходящие с упругой волной в геологической среде. Ha сейсмограммах присутствует полный набор эффектов, негативно влияющих на качество материала. Моделирование для условий ВКМС необходимо выполнять на основе решения конечно-разностного волнового уравнения для тонкослоистых моделей, максимально приближенных к строению изучаемой среды. Такой подход обеспечивает максимальное соответствие фактического (регистрируемого) и теоретического (рассчитываемого) волновых полей, И, как следствие, максимальную объективность получаемых результатов.

В рамках исследований сейсмическое моделирование проведено в два этапа. На первом этапе прямая задача решалась с использованием поверхностного источника, имитирующего распространение плоской волны в среде, что позволяет дать экспресс-оценку получаемых синтетических материалов. По результатам первого этапа было построено и рассчитано 74 тонкослоистых модели по данным АК, с присутствием тектонических нарушений различных размеров. Основные дислокации, которые заложены в модели: зона замещения, зона складчатости, трещиноватая зона дробления, разрывные нарушения, флексуры, зона, антиклинальные и синклинальные одиночные складки. Полученный результат позволил определить возможности сейсморазведки в условиях, приближенных к реальному залеганию соляной толщи. Так, на синтетических разрезах довольно

контрастно выделяются отражающие границы от пластов ПП, МГ и ГАТ. Помимо этого, в соляной толще присутствует отражение, ассоциируемое с переслаиванием карналлитов с каменной солью. В волновой картине, полученной в результате моделирования четко проявляются изменения, связанные с присутствием тектонических дислокаций. Полный перечень рассчитанных в рамках диссертации представлен в приложении А.

На втором этапе проведено моделирование с точечным источником сферической волны для моделей среды с неоднородностями, выбранными по результатам расчетов, проведенных на первом этапе с использованием поверхностного источника плоской волны. Моделирование с использованием сферического источника позволило получить отдельные синтетические сейсмограммы общего пункта возбуждения. Построены тонкослоистые модели зон интенсивной складчатости, приближенные к реальным, встреченным при изучении ВКМС. В результате моделирования получены синтетические сейсмограммы, которые соответствуют наблюденным полевым сейсмограмм, полученным по результатам поверхностной сейсморазведки МОВ МОГТ, с присутствием волн-помех и интерференцией элементарных отражений. Перед тем как переходить к интерпретации этих данных необходимо отфильтровать помехи на стадии обработки.

В заключении главы можно сформулировать 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».

## ГЛАВА 4. ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ МАЛОГЛУБИННОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

В настоящее время при обработке сейсморазведочных данных на ВКМС применяется стандартный граф, характерный для изучения малых глубин. На этапе обработки особую роль играют процедуры коррекции статических поправок (высокочастотная статика) пространственно-временная (когерентная) И фильтрация. Эти процедуры применяются в основном для подчеркивания полезного сигнала увеличения синфазности осей, соответствующих И геологическим границам. Описанные процедуры имеют и негативные стороны, параметрах оператора при определенных данные например, становятся сглаженными, а в местах отсутствия полезного сигнала начинают проявляться протяженные оси. Таким образом, можно получить отражающие границы на сейсмических разрезах при полном их отсутствии в исходных данных.

В качестве примера рассчитаем сейсмограммы, амплитуды отдельных трасс которых сгенерируем случайным образом, с частотным составом от 10 до 120 Гц. образом, получим сейсмограммы (Рисунок 35а), не содержащие Таким закономерного сигнала (белый шум). Используя минимальный набор процедур (полосовую фильтрацию, амплитудную коррекцию и мьютинг) получим обработанные сейсмограммы ОПВ (Рисунок 35б), на которых также не проявляется закономерностей. После суммирования сейсмограмм, отсортированных по ОГТ получим временной псевдо-разрез, содержащий только шум. Далее по псевдо-разрезу в несколько циклов проведем когерентную фильтрацию, получим итоговый временной псевдо-разрез (Рисунок 35г), на котором уже видны закономерные протяженные оси синфазности, которые могут быть проинтерпретированы по-разному. Сигнал, регистрируемый при помощи импульсного порохового и механического источников слабый и в зависимости от поверхностных условий и строения ВЧР может отсутствовать полностью, поэтому применение когерентной фильтрации может работать аналогичным образом.



Рисунок 35 – Пример обработки сейсмограмм со случайным сигналом (а – сгенерированная сейсмограмма, б – обработанная сейсмограмма по стандартному

графу, в – суммарный временной разрез, г – временной разрез после

пространственно-временной (когерентной) фильтрации

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 [27, 38, 41]. В условиях малоконтрастной соляной толщи необходимо внимательно относиться к выбору процедур обработки. 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. 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.

## 4.1 Подготовка данных к цифровой обработке

Процесс обработки состоит из нескольких этапов. На первом этапе производится расчет статических поправок. Автором проанализированы различные методики расчета поправок. В процессе анализа исходные данные были обработаны с использованием двух программных модулей. Первый, предназначен для обработки данных метода преломленных волн, реализованный в программе RadExPro [37]. Второй, на основе программы сейсмической томографии ZondST2D [42] для вариантов слоистой и градиентной среды, с различными способами инверсии. На основе анализа устойчивости получающихся графиков статических поправок и их корреляции с графиком отметок рельефа, выбран вариант градиентной среды с гладкой инверсией.

Процедура расчета статических поправок состоит из трех основных этапов:

- обработка данных высокоточной топографо-геодезической съемки;
- построение априорной сейсмогеологической модели ВЧР;
- вычисление статических поправок для каждого ПВ и ППр.

На каждом из этапов есть свои сложности, которые могут негативно влиять на итоговый результат. Например, на этапе полевых работ важно вести съемку всех перегибов (углов) профильной линии в плане и перегибов рельефа (лога, реки и возвышенности). Если эти данные не учесть, годографы будут искажены, что негативно скажется на этапе обработки, а именно – отражения от геологических границ будут несинфазно просуммированы, что приведет к их ослаблению, либо отсутствию на итоговых временных разрезах.

Для использования в условиях Верхнекамского месторождения солей предлагается методика расчета статических поправок [7, 26] на основе модели ВЧР построенной по данным метода сейсмотомографии. В программе ZondST2D (или аналогичной) прослеживаются первые вступления, с использованием которых на основе итерационного подхода – многократного решения прямой и обратной задачи подбирается скоростная модель ВЧР. Полученная модель совместно с графиком рельефа являются исходными данными для программы собственной разработки, где автоматически по заложенному алгоритму выполняется окончательная обработка результатов и расчет статических поправок для заданной линии приведения (Рисунок 36).



Рисунок 36 – Классический вариант расчета статических поправок [7]

Алгоритм расчета статических поправок заключается в следующем:

 находится разница между уровнем приведения и линией наблюдения для каждого ППр и ПВ;

– полученная величина разбивается на ячейки равные размерам блоков скоростной модели ВЧР, полученной по результатам сейсмотомографии;

– для каждой ячейки вычисляется время пробега волны;

– выполняется вертикальное суммирование времен пробега волны по ячейкам для каждого ППр и ПВ. Полученные значения и являются статическими поправками, которые вводятся для каждого пункта приема и возбуждения.

Используя литологические колонки разведочных скважин по линиям профилей предлагается отстраивать априорные геологические разрезы

(Рисунок 37), которые необходимы как в процессе обработки, для того чтобы избежать грубых ошибок, связанных с наклоном границ и их относительным положением на разрезах, так и на этапе интерпретации для привязки отражающих горизонтов.



Рисунок 37 – Пример априорного геологического разреза

Дальнейшие этапы обработки будут рассмотрены на примере программы RadExPro, которая предназначена для полнофункциональной комплексной обработки данных наземной, речной и морской сейсморазведки, контроля качества полевых сейсмических данных [37]. Система позволяет открывать файлы практически любой структуры, если известен их формат, присваивать геометрию, обладает развитым инструментом хранения графов обработки и промежуточных результатов на основе базы данных (Рисунок 38, а). Данные загружаются в систему с помощью процедуры SEG-Y Input, позволяющей открывать входные файлы формата sgy, segy и др. (Рисунок 38, б).



Рисунок 38 – Главное окно программы RadExPro (а – поток предварительной обработки в системе RadExPro, б – параметры процедуры загрузки данных)

После загрузки данных рассчитываются координаты трасс с помощью программ собственной разработки EJ [10] и FastMineProc [23], которые записываются в заголовки трасс с помощью инструмента Geometry Spreadsheet. После записи основных заголовков, описывающих положение ПВ и ППр необходимо проведение бинирования с помощью процедуры Crooked Line 2D Binning (Рисунок 39). Под 2D бинированием подразумевается построение равномерной сети бинов по линии наблюдения и привязка точек ОГТ к соответствующим бинам. При шаге ПВ 10 м, а ППр 5 м шаг бинирования выбран 2,5 м, ширина полосы изменялась от 10 до 50 м, в зависимости от изогнутости профилей.



Рисунок 39 – Пример 2D бинирования по профилю

По результатам бинирования в заголовки файлам были записываются номера и координаты ОГТ, удаления ПВ-ППр (CDP, CDP\_X, CDP\_Y, OFFSET). После формирования файлов со всеми необходимыми заголовками проводится проверка геометрии по сейсмограммам ОПВ (Рисунок 40).



Рисунок 40 – Сейсмограммы ОПВ (а – проверка геометрии по сейсмограммам ОПВ (синяя линия), вид пикировок первых вступлений (красная линия), кривая мьютинга (оранжевая линия), б – частотный спектр)

#### 4.2 Технология цифровой обработки сейсморазведочных материалов

Процесс обработки данных можно разделить на три основных этапа: предварительная обработка сейсмограмм, окончательная обработка сейсмограмм и обработка временного разреза.

Предварительная обработка сейсмограмм включает в себя процедуры редакции и восстановления полярности инвертированных трасс, регулировки амплитуд, фильтрации для подавления низкочастотной составляющей записи (поверхностных волн, частично преломленных), фильтрации случайных высокочастотных помех.

Для этого используются процедуры:

– Trace Editing – в режиме инверсии трасс для восстановления полярности (при необходимости);

– DC Removal – удаление постоянной составляющей в окне 0–500 мс;

– Amplitude Correction – автоматическая регулировка в окне 100 мс для выравнивания амплитуд записи;

– Bandpass Filter – полосовая фильтрация для частичного подавления низкочастотных волн-помех и случайных высокочастотных шумов, граница снизу 10–30 Гц, сверху – 150–180 Гц, либо для вырезания определенных гармоник в режиме режекторного фильтра, например, 50 Гц, или более высоких гармоник – 100, 150 Гц;

– либо Spectral Whitening – спектральное отбеливание, для выравнивания частотного спектра с помощью автоматической регулировки амплитуды в узких диапазонах частотного спектра, число диапазонов 4–5, автоматический выбор диапазонов, минимальная частота 10–20 Гц, максимальная частота 150–180 Гц;

– Predictive Deconvolution – предсказывающая деконволюция в режиме расширения спектра сигнала, интервал времени 50–(400÷500) мс, длина интервала предсказания 1 отсчет (что и задает режим расширения спектра), длина фильтра 50, уровень белого шума 0,1–1%; – повторное применение амплитудной коррекции (при необходимости), Bandpass Filter или Spectral Whitening для выравнивания спектра после деконволюции;

– Trace Editing – в режиме мьютинга (обрезки) предварительно прослеженных первых вступлений, для уменьшения замешивания преломленных волн в окончательный временной разрез.

Для примера на рисунке 41 представлен фактический поток предварительной обработки по опытному профилю с параметрами использованных процедур.

Толевые сейсмогра	ммы	Trace Input <- 001_Поле	вые сейсмогра	ммы	
Bandpass Filtering		Spectral Whitening			
n		Amplitude Correction			
	×	Amplitude Correction			×
Filter parameters Low-cut ramp: 0% [ High-cut ramp: 100% [ 0% [	0 (Hz) 10 (Hz) 120 (Hz) 150 (Hz)	Time raised to power Exponential correction (dB/ms) Normalization None Constant time 0.0 Horizon	2.0 0.0 0 - trace cen	ter	
Number of threads: 0 OK Cancel		Header AAXFILT Maximum application time Automatic gain control Operator length (ms) Ty 100.0 M Save AGC coefficients to datas	0.0 0 ype of AGC scalar HEAN V set:	- trace end Basis for scalar applicati CENTERED	on V
		Trace equalization Basis for scaling MEAN Time variant scaling Example format: t1:k1,t2-t3:k2,, Specify gain function along trace (t)	Time gate start time ( 0.0 ,tW:kN	(ms) Time gate end tim	ie (ms)
	Filter parameters         Low-cut ramp:       0%         High-cut ramp:       100%         Number of threads:       0%         OK       Cancel         A       A	Полевые сейсмограммы n × Filter parameters Low-cut ramp: 0% 0 (H2) High-cut ramp: 100% 120 (H2) 0% 150 (H2) Number of threads: 0 OK Cancel	Полевые сейсмограммы       Trace Input <- 001_Поле	Trace Input <- 001_Полевые сейсмограм	DoneBule ceйcmorpammul       Trace Input <- 001_Полевые сейсмограммы

Рисунок 41 – Параметры процедур обработки (а – полосовая частотная фильтрация, б – амплитудная коррекция)

Пример сейсмограмм до предварительной обработки и после нее представлены на рисунке 42. Видно, что в результате обработки ширина спектра значительно увеличилась (в 1,5 раза), при этом подавлены низкочастотные волны-помехи, в том числе поверхностные волны.



Рисунок 42 – Сейсмограммы ОПВ (а – полевая сейсмограмма, б – частотный спектр полевой сейсмограммы, в – обработанная сейсмограмма, г – частотный спектр обработанной сейсмограммы)

Необходимо пояснить, почему амплитудную регулировку пришлось выполнять в виде автоматической регулировки, да еще и в относительно узком окне. Поскольку контрастность отражающих границ в целевом интервале крайне низкая, что подтверждается, в том числе, результатами акустического каротажа и моделирования, то обработка с сохранением амплитуд приводит к тому, что целевые границы не выделяются на итоговом разрезе. А поскольку интересующий нас интервал относительно узкий (порядка 100 мс), то пришлось использовать соответствующее окно для регулировки, иначе любая, хоть сколько-то заметная ось синфазности будет приводить к подавлению соседних осей в пределах половины окна регулировки, что и видно на примере отражения от подошвы солей.

Окончательная обработка сейсмограмм включает в себя ввод рассчитанных ранее статических поправок, фильтрацию для дальнейшего выделения сигнала на фоне помех, анализ скоростей ОГТ, ввод кинематических поправок, коррекцию статических поправок, уточнение скоростного закона, суммирование.

На данном этапе выполняются следующие процедуры:

92

 Apply Statics – ввод ранее рассчитанных статических поправок за ПВ и ППр для приведения данных к уровню приведения;

– Bandpass Filter, Spectral Shaping, или Spectral Whitening – одноканальная фильтрация в частотной области;

 Interactive Velocity Analysis – интерактивный скоростной анализ (Рисунок 43) с целью оценки скоростей ОГТ для дальнейшего ввода кинематических поправок



Рисунок 43 – Пример окна скоростного анализа (а – спектр скоростей, б – суперсейсмограмма ОГТ, в – сумма с подобранной скоростной функцией, г – суммы с перебором постоянных скоростей)

NMO – ввод кинематических поправок для спрямления годографов ОГТ,
 с автоматическим мьютингом сигнала, искаженного более чем на 30%;

– FK-Filtering – фильтрация в области FK для подавления линейных осей синфазности – преломленных, поверхностных волн (применяется при необходимости), параметры выбираются под конкретную волну-помеху;

– Max Power Autostatics и Apply Statics – расчет и ввод корректирующих статических поправок по предварительно прослеженным отражающим горизонтам, как правило, совместно по ППр, МГ, подошвы соляной толщи;

– F-K Amplitude Power – возведение двумерного амплитудного спектра в произвольную степень для улучшения когерентности записи, основной параметр Exponent, как правило, от 1.2 до 1.5;

– Interactive Velocity Analysis – повторный интерактивный скоростной анализ в целях уточнения скоростей ОГТ для дальнейшего ввода кинематических поправок, и формирования разрезов эффективных скоростей;

Ensemble Stack – суммирование сейсмограмм ОГТ во временной разрез.
 В качестве примера на рисунке 44 приведены параметры процедур обработки
 сейсмограмм – ввод статических поправок, ввод кинематических поправок,
 пространственная фильтрация и коррекция статических поправок.



Рисунок 44 – Поток обработки сейсмограмм с параметрами основных процедур

(а – ввод статических поправок, б – ввод кинематических поправок,

пространственная фильтрация F-K Amplitude Power и повторный мьютинг,

в – коррекция статических поправок)

Обработка временного разреза – включает в себя фильтрацию для улучшения соотношения сигнал/шум, прослеживание отражающих горизонтов во временной области, перевод из временной области в глубинную, прослеживание отражающих горизонтов в глубинной области. На данном этапе выполнялись следующие процедуры:

– Predictive Deconvolution – предсказывающая деконволюция в режиме расширения спектра сигнала, интервал времени 50-500 мс, длина интервала предсказания 1 отсчет (что и задает режим расширения спектра), длина фильтра 51, уровень белого шума 0.1-1%;

– Bandpass Filter или Spectral Whitening – фильтрация в частотной области;

FK-Filtering – фильтрация в fk-области для подавления линейных осей синфазности – преломленных, поверхностных волн (применяется при необходимости), параметры выбираются под конкретную волну-помеху;

 F-K Amplitude Power – возведение двумерного амплитудного спектра в произвольную степень для улучшения когерентности записи, основной параметр Exponent, как правило от 1,2 до 1,5;

– Time/Depth Conversion – перевод разреза из временной области в глубинную.

Окно программы с параметрами процедур описанных выше представлено на рисунке 45.

97
----

/065 СУММ+МТ+СТ+FК+ФЛ	Bandpass filtering				
Trace Input <- CT+FK+cymma	Filter type Filter parameters				
DC Removal	C Simple bandpass filter Low-cut ramp: 0% 10 (Hz)				
Bandpass Filtering	Ormsby bandpass filter 100% 20 (Hz)				
Predictive Deconvolution	C Butterworth filter				
Bandpass Filtering	C Notch filter High-cut ramp: 100% 120 (Hz)				
F-K Filter	0% 150 (Hz)				
F-K Amplitude Power					
Trace Output -> мьютинг и статика+fk+сумма+фл3					
Screen Display	OK Cancel				
2	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·				
a	D				
Predictive Deconvolution Parameters	F-K Amplitude Power				
Start Time         50         End Time         400	Exponent 1.5				
Prediction Gap	Time dimension				
Deconvolution Operator 50	Time window, ms 400 Trace window 100				
"White Noise" Level 1 %	Time shift, ms 20 Trace shift 20				
OK Cancel					
Cancer	I I I I I I I I I I I I I I I I I I I				
	FX domain only				
Р	Get hy ensemble				
D	OK Cancel				
F-K Filter parameters	×				
Type					
Polynon					
опытный\065 СУММ+МТ+СТ+FK+ФЛ\%1					
C Fan					
Format: dip1.dip2.f1.f2/dip1.dip2.f1.f2 (m/s. Hz)					
□ Wrap					
Operation mode Ensembles Distance I	between traces (DX)				
(• Calcu	Reject     I Use ensembles     (• Calculate from geometry headers     X coordinate header				
C Pass					
	r coordinate header CDP_X				
Taper window width (%) 10 C Set M	Taper window width (%) 10 C Set Manual Manual DX (m)				
OK Cancel					
Д					

Рисунок 45 – Поток обработки временного разреза

(а – список процедур, б – полосовая фильтрация, в – предсказывающая деконволюция в режиме расширения спектра, г – пространственная когерентная фильтрация, д – FK-фильтрация для удаления линейных осей синфазности) В качестве примера на рисунке 46 приведен временной разрез до и после окончательной обработки. После завершения этапа обработки временные разрезы пересчитываются в глубинные, которые являются основой для дальнейшей геологической интерпретации.

На разрезе после обработки по предложенной технологии проявляются динамически выраженные оси синфазности от основных акустически жестких границ (Рисунок 466) – кровли (t<sub>0</sub>=150 мс) и подошвы (t<sub>0</sub>=350 мс) солей, пласта МГ (t<sub>0</sub>=240 мс). Также, проявляются отражения от пластов внутри соляной толщи в интервале t<sub>0</sub> от 150 до 250 мс, проследить которые по всей длине профиля проблематично из-за разрывов осей синфазности, связанных с низкой акустической жесткостью на границе слоев солей различного химического состава, например, каменной соли и сильвинитовой породы. Особенно сложно выделить нарушения, связанные с внутрисоляными деформациями, такие как складчатость, зона замещения, трещиноватость и др.

Таким образом, по результатам проведенных сейсморазведочных исследований при поисках и разведке месторождений солей мы имеем сложную интерференционную волновую картину, достоверность интерпретации которой связана с различными факторами, влияющими на разных этапах на получаемый результат.



Рисунок 46 – Временной разрез по профилю (а – до, и б – после окончательной обработки)

#### 4.3 Сейсмическое моделирование в процессе обработки

Процесс привязка сейсморазведочных данных очень важен, так как в условиях высокоскоростного разреза толщи солей даже незначительные ошибки горизонты могут привести К серьезным последствиям, когда будут проинтерпретированы без реального соответствия геологии участка исследований. Для корректной привязки отражающих горизонтов, полученных по результатам сейсморазведочных работ, к геологическим границам на этапе камеральных работ автором предлагается проведение сейсмического моделирования на основе имеющихся геологических и геофизических скважинных данных, что позволяет определить реальное положение целевых отражающих горизонтов на временных разрезах.

В качестве инструмента для решения прямой задачи сейсморазведки при изучении ВКМС предлагается использовать конечно-разностное численное моделирование [31, 33, 40], успешно применяемое при сейсморазведочных работах при поисках и разведке нефтяных и газовых месторождений уже несколько десятилетий [1, 38]. Точность моделирования ограничивается только сложностью дифференциального приближения используемого волнового уравнения И совершенством применяемых Моделирование техническим схем расчета. предлагается выполнять в программном комплексе Tesseral Pro или аналогичных. Программный моделирование пакет позволяет осуществлять полного сейсмического (акустического) поля [40].

В качестве исходных данных для моделирования используются геологические колонки и данные акустического каротажа по скважинам, находящимся в пределах профильных линий. Имея эту информацию, появляется возможность привязки по отметкам времени и временным мощностям основных отражающих горизонтов.

Исходными данными (акустического каротажа) для построения сейсмогеологической модели является las-файл, в котором записаны значения интервального времени пробега волны за единицу длины (DTP в мкс/м). Детальность вертикальной разбивки модели соответствует шагу снятия значений

при наблюдениях АК и составляет не более одного метра [31].

На рисунке 47 представлен пример горизонтально-слоистой сейсмогеологической модели участка ВКМС, построенной по данным АК. На модели отмечаются основные отражающие горизонты, а также неоднородная ВЧР и ЗМС.



Рисунок 47 – Пример сейсмогеологической модели исследуемого разреза

При построении модели рекомендуется выбирать следующие параметры: длина модели 600 м, глубина 600 м, детальность разбиения слоев 0,1 м, источник колебаний – всесторонне-направленный, поверхность (возбуждение плоской волны), исходный сигнал – импульс Риккера типа Single (простой) с пиковой частотой 60 Гц, шаг пунктов приема 5 м, общая длина профиля возбуждения и регистрации 600 м, шаг дискретизации 0,5 мс, длина записи 1024 мс.

Ниже приведен пример полученных данных на участке, где мощность интервала между СЗ и МГ составляет в среднем 60 м, что является относительно низким показателем и связано с выклиниванием калийной залежи на ее краю (Рисунок 48). Результатом моделирования является синтетический временной разрез (Рисунок 48г), который используется для привязки отражающих горизонтов на временных разрезах.



Рисунок 48 – Привязка временных разрезов к скважинным данным (а – скорости по данным АК в глубинной шкале, б – скорости по данным АК во временной шкале, в – ТОО, г – участок синтетического временного разреза, д – участок временного разреза по профилю на расстоянии 1,5 км от скважины)

102

Процесс привязки состоит из нескольких этапов, основные из которых представлены на рисунке 48. Исходные данные акустического каротажа (Рисунок 48а), т.е. 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 пересчитываются в трассу однократных отражений (рисунок 48в). Расчет и построение ТОО производился с использованием программ собственной разработки. ТОО и синтетический временной разрез увязываются между собой (Рисунок 48г) и сопоставляются с участком временного разреза (Рисунок 48д). На представленном примере профиль сейсморазведочных работ находился в 1,5 км от скважины, по данным АК на основе которой производилось моделирование.

Привязка наблюденного временного разреза К синтетическому корреляцию взаимному показывает надежную ПО положению осей синфазности (временные мощности) и амплитудам отражений, что позволяет сделать вывод о корректности примененных процедур обработки. В интервале от СЗ до МГ на временах от 130 до 170 мс, судя по АК и ТОО (Рисунки 486 и 48в), наблюдаются слабые отражения, однако на временном разрезе их интенсивность примерно равна интенсивности отражений от СЗ и МГ. Это объясняется тем, что при обработке разрезов применена автоматическая регулировка усиления в относительно узком окне. Как показывают результаты моделирования, без АРУ выявить отражения в указанном интервале крайне сложно. А в силу низкой акустической контрастности внутри соляной толщи, степень достоверности отражений, выделяемых В результате при автоматической регулировки усиления, нельзя считать высокой.

В условиях отсутствия данных акустического каротажа в скважинах, пробуренных в районе проведения сейсморазведочных работ предлагается проводить построение моделей среды на основе зависимости между литологией и интервальной скоростью на других участках месторождения. В качестве исходных данных при таком подходе используются геологические колонки скважин на исследуемом участке и АК в ближайших к исследуемому участку скважин. В качестве примера данные АК взяты по двум скважинам, которые расположены на расстоянии 10 и 12 км от профилей сейсморазведки. АК в скважинах проведен интервалами, поэтому была построена сводная псевдо-акустическая кривая по данным двух скважин. Для построения псевдо-акустической кривой использовались данные о литологическом строении участка, закономерностях между литологией и изменением скорости продольных волн, результаты АК в ближайших скважинах и результаты корреляции АК на разных участках ВКМС. На рисунке 49 представлена сейсмогеологическая модель, построенная по данным ПАК.





При построении модели на основе данных ПАК использовались следующие параметры: длина 1000 м, глубина 650 м, детальность разбиения слоев – 0,1 м, источник колебаний – всесторонне-направленный, тип источника – поверхность (возбуждение плоской волны), сигнал – импульс Риккера типа Single (простой), с пиковой частотой 60 Гц, шаг пунктов приема 5 м, общая длина профиля возбуждения и регистрации 1000 м, шаг дискретизации 0,25 мс, длина записи 1024 мс.

Процесс привязки состоял из нескольких этапов, описание которых, в целом, соответствует ранее приведенному примеру (Рисунок 48). Но помимо использования данных ПАК (Рисунок 50а) при построении модели для

решения прямой задачи, на этапе привязки впервые использовались данные шахтной сейсморазведки на поперечных волнах (Рисунок 50д). Привлечение данных ПВРО [13, 21, 29] позволило повысить надежность привязки отражающих горизонтов, полученных c помощью поверхностной сейсморазведки. ТОО и синтетический временной разрез были увязаны между собой и сопоставлены с участком временного разреза (Рисунок 50г). Привязка показала, что взаимное положение основных динамически выраженных осей синфазности, временные мощности пластов и амплитуды отражений хорошо коррелируются между собой, что позволяет сделать вывод о корректности обработки примененных процедур обоснованности дальнейшей И интерпретации.

В связи с необходимостью ведения корректной интерпретации разработана методика поисков тектонических нарушений для условий малоконтрастной толщи ВКМС, основанная на программном анализе волновой картины, в частности, анализе сейсмических атрибутов.



Рисунок 50 – Привязка временных разрезов к данным ПАК (а – скорости по данным ПАК в глубинной шкале, б – скорости по данным ПАК во временной шкале, в – ТОО, г – участок наблюденного временного разреза, д – участок синтетического временного разреза, е – участок шахтного временного разреза)

106

### ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

В рамках диссертации проведен анализ процесса цифровой обработки малоглубинных сейсморазведочных материалов, по результатам которых, автором установлено, что в условиях малоконтрастной соляной толщи нужно очень внимательно относиться к выбору процедур обработки [34]. Выявлены процедуры как положительно влияющие на получаемый результат, так и отрицательно. Предложена и обоснована технология обработки, которая позволяет корректно выделить полезный сигнал на фоне волн-помех. Использование процедур пространственной (когерентной) фильтрации практически исключается по причине их искажающего эффекта. Амплитудную регулировку предлагается выполнять в виде автоматической регулировки, да еще и в относительно узком окне, поскольку контрастность отражающих границ в целевом интервале крайне результатами низкая, что подтверждается акустического каротажа И моделирования. Обработка с сохранением амплитуд приводит к тому, что отражения внутри соляной толщи не выделяются на разрезе.

Проследить отражения внутри соляной толщи по всей длине исследуемых профилей сложно и особенно тяжело выделить тектонические нарушения, связанные с внутрисоляными деформациями. Таким образом, при изучении месторождений солей мы имеем сложную волновую картину, достоверность интерпретации которой может не соответствовать предъявляемым требованиями и поставленным задачам.

Третье защищаемое положение сформулировано следующим образом: «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».

107

# ГЛАВА 5. МЕТОДИКА ВЫДЕЛЕНИЯ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ

#### 5.1 Атрибуты волнового поля и атрибутный анализ

В реальных тонкослоистых средах, к которым относится и осадочная толща Верхнекамского месторождения солей, при недостаточной разрешающей способности метода далеко не всегда удается разделить на записях соседние отражения, что ограничивает набор методов интерпретации. На сейсмических разрезах присутствуют целевые отражающие горизонты в виде устойчивых интерференционных колебаний, амплитуды которых зависят от множества параметров пачки тонких слоев [1]. В такой пачке участки крайне сложного залегания слоев чередуются с участками относительно выдержанного горизонтально-слоистого залегания.

Выделить индивидуальные отражения от границ тонких слоев невозможно. Однако, суммарный вклад пачек в интерференционную волновую картину может быть вполне ощутимым, проявляясь в таких особенностях рисунка сейсмической трассы, как относительная амплитуда того или иного экстремума, своеобразие формы колебаний, изменение их видимого периода и др. При этом, нередко использовать оказывается возможным установить И для интерпретации статистические зависимости ряда параметров интерференционного пакета отраженных волн от эффективных свойств соответствующей пачки пластов. Такой подход реализуется в статистических методах интерпретации волнового поля, таких как атрибутный анализ.

С помощью атрибутного анализа возможно получение объективной и более детальной оценки волновой картины, которая помогает отметить особенности, не замеченные при визуальном изучении временного разреза. Атрибуты волнового поля – это параметры, описывающие геологическую среду на качественном уровне. На сейсмических частотах отражение формируется тонкослоистыми пачками, генерирующими целый цуг элементарных колебаний различной природы: однократных, многократных, монотипных и обменных волн-спутников,
интерферирующих между собой. Даже при наличии достаточно сильной границы, погаситься при интерференции отражение от нее может элементарных колебаний [1]. Атрибутный анализ – метод интерпретации, использующий классический регрессионный анализ [1, 7]. Под сейсмическими атрибутами обычно понимаются локальные характеристики сейсмической записи, у которых можно определить конкретные числовые значения и проанализировать их с целью детальной динамической и геологической интерпретации. Количество возможных атрибутов и связей этих атрибутов между собой измеряется десятками. Из них чаще используют те, которые наиболее чувствительны к изменениям амплитудных и фазовых характеристик колебаний и притом достаточно устойчивы к случайным искажениям. Сюда относятся мгновенные динамические характеристики, псевдоакустические жесткости, параметры AVO-анализа, локальные градиенты (наклоны) осей синфазности, производные и интегралы от графиков колебаний, их спектральные плотности, отношения амплитуд и разности времен соседних экстремумов, отклонения оценок от их средних значений вдоль горизонта и пр.

Для обоснованного применения атрибутного анализа необходимо иметь априорную информацию по скважинам, расположенным на исследуемой площади. Сравнивая свойства пород по керну и данные ГИС по целевому интервалу разреза с оценками различных атрибутов соответствующего отражающего горизонта, интерпретатор может выявить существование между ними значимых статистических связей. С этой целью, используя специализированные программы, строят графики соотношений сопоставляемых параметров и вычисляют парные коэффициенты корреляции между ними.

К сожалению, выполнять атрибутный анализ на основе данных ГИС и свойств керна с целью картирования геологических неоднородностей не представляется возможным, поскольку данные для установления надежных статистических зависимостей на Верхнекамском месторождении солей отсутствуют. Помимо этого, по результатам бурения невозможно установить горизонтальные размеры выявленных неоднородностей. Для некоторых же неоднородностей невозможно установить целый ряд важных параметров. Поэтому,

атрибутному регрессионному анализу подвергнуты результаты расчета теоретических волновых полей для основных типов тектонических дислокаций. Использование конечно-разностной схемы расчета волнового уравнения и детальных тонкослоистых моделей обеспечивает достоверность результатов, которые будут давать выбранные атрибуты в реальных геологических условиях.

При проведении нефтегазовых сейсморазведочных исследований широко используется алгоритм атрибутного анализа, на основе которого разработана собственная методика для условий ВКМС, основанная на поиске корреляционных зависимостей графиков отдельных атрибутов.

Процесс расчета сейсмических атрибутов реализован в программном комплексе RadExPro (или аналогичных) посредствам модуля Seismic Sequence Attribute Analysis. Все атрибуты можно разделить на несколько подклассов: амплитудные, частотные (спектральные), корреляционные. В рамках модуля SSAA можно вычислить следующие атрибуты сейсмической записи:

- частота, отвечающая главному максимуму в спектре;

– среднее значение частоты:

$$fc = \frac{\overset{fN}{\mathbf{o}}f \left| S(f)df \right|}{\overset{fn}{\mathbf{o}}S(f)df \right|}$$
(4)

где S(f) – спектр временного окна, в котором производится оценка частоты;

f – Частота;

fN – частота Найквиста;

видимая частота, полученная по оценке количества переходов через 0:

$$f_{NZ} = \frac{N_{ZC}}{2(t_{last} - t_{first})},$$
(5)

где  $N_{ZC}$  – количество переходов через 0;

 $t_{last}$  – время последнего перехода через 0;

*t*<sub>*first*</sub> – время первого перехода через 0;

- кажущаяся частота;
- видимая частота сигнала, оцененная по величине радиуса корреляции;
- частотный диапазон;
- максимальное значение амплитуды;
- минимальное значение амплитуды;
- максимальное абсолютное значение амплитуды;
- среднеквадратичное значение амплитуды;
- амплитуда, отвечающая главному максимуму;
- время, соответствующее максимальному значению амплитуды;
- время, соответствующее минимальному значению амплитуды;

время, соответствующее максимальному абсолютному значению амплитуды;

 соотношение сигнал/шум, оцененное по нормированной взаимной корреляции между парами соседних трасс;

– разрешающая способность [37].

Расчет сейсмических атрибутов проводился в заданном окне, размер которого выбирался так, чтобы аномалия от геологической неоднородности на синтетических данных находилась в его центре.

# 5.2 Алгоритм получения суммарного сейсмического атрибута на основе разработанного программного обеспечения AtAn

Для оптимизации процесса работы с графиками сейсмических атрибутов автором разработано программное обеспечение AtAn [32] (Рисунок 51), позволяющее проводить корреляционный анализ по нескольким расчетным схемам.

Стандартная схема – перебор графиков сейсмических атрибутов и поиск корреляции между ними (каждый с каждым), коррелирующие добавляются в суммарный сейсмический атрибут. Расчет от модели – задается модель, с которой находится корреляция графиков сейсмических атрибутов, коррелирующие добавляются в суммарный сейсмический атрибут.

	Коэф. Корел.	Кол-во пикировок	<i>i</i>														
Расчет Загрузка данных	0.70	4		PeF	CF	AF	VF	Bnd	PeA	TA	MAA	RMSA	PiA	PeAT	TAT	MAA	T S/N
	Размер окна		Зона замещения	-1	0	-1	-1	0	0	0	0	-1	-1	0	0	0	0
Графика Запрузка модели	5	Стандартная таблица	Зона складчатости	0	-1	-1	-1	0	1	0	1	-1	-1	1	1	1	-1
Description	П Нормировк	ка по разрезу	Антиклинальная складка	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	-1	0
@ Compacters			Синклинальная складка	0	-1	0	-1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0
Опандартная схема     Опандартная схема	Элемент таблицы О Зона зэмецения О Зона складчатости О Антиклинальная складка О Синкинальная складка		Флексурная складка	0	-1	0	0	-1	0	-1	0	-1	-1	0	0	0	0
О Расчет от модели			Зона трещиноватости	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
О Расчет от атриоута			Разрывное нарушение	-1	-1	D	-1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0
Орасчеготтаслицы			Зона дробления	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Visible Frequency     Bandwidth     Peak amplitude     Through amplitude     Max abs. amplitude     MaX amplitude     Pick amplitude     Pick amplitude     Pick amplitude time     Through amplitude time     Max abs. amplitude time																	
O S/N Ratio																	

Рисунок 51 – Окно программы атрибутного анализа AtAn

Расчет от атрибута – пользователь выбирает из набора имеющихся графиков один, с которым в дальнейшем производиться корреляционный анализ остальных, коррелирующие добавляются в суммарный сейсмический атрибут. Расчет от таблицы – в программу вшита таблица коэффициентов, которая получена по результатам атрибутного анализа по моделям. Пользователь выбирает тип тектонического нарушения, которое он хочет идентифицировать, а программа согласно таблице, выбирает работающие атрибуты и их полярность, после чего они добавляются в суммарный сейсмический атрибут.

Исходными данными для программы AtAn являются значения атрибутов в виде таблицы, рассчитанные в окне вдоль основных отражающих горизонтов на временных разрезах. В качестве исходных данных также могут быть добавлены различные параметры волновой картины, скважинные данные и результаты погоризонтного анализа скоростей.

Помимо этого, в программе имеется возможность изменить коэффициент корреляции, используемый для анализа, сгладить и инвертировать графики отдельных атрибутов, проводить их анализ в отдельном окне (Рисунок 52).



Рисунок 52 – Окно анализа графиков нормированных атрибутов

В программе предусмотрен контроль за корреляцией отдельных графиков атрибутов, для подтверждения правильности формирования ССА, выполненный в виде таблицы. В таблице выделяются поля с устойчивой корреляцией (Рисунок 53).

Nº	Peak Frequency	Centroid Frequency	Apparent frequency	Visible Frequency	Bandwidth	Peak amplitude	Through amplitude	Max. abs. amplitude	RMS amplitude	Pick amplitude	Peak amplitude time	Through amplitude	Max. abs. amplitude	S/N Ratio	Номер пикировки
Centroid Frequency	0.7														1     1
Apparent frequency	0.84	0.81													02
Visible Frequency	0.72	0.86	0.75												03
Bandwidth	-0.05	-0.28	0.01	-0.56											04
Peak amplitude	-0.21	0.07	-0.24	0.22	-0.7										
Through amplitude	0.76	0.71	0.77	0.56	0.11	-0.48									
Max. abs. amplitude	0.79	0.85	0.84	0.68	-0.04	-0.23	0.94								
RMS amplitude	0.41	0.62	0.36	0.59	-0.54	0.58	0.39	0.58							
Pick amplitude	-0.03	-0.31	-0.01	-0.38	0.65	-0.65	-0.05	-0.17	-0.76						
Peak amplitude time	-0.01	0.02	-0.09	-0.01	-0.11	0.36	-0.17	0	0.25	0					
Through amplitude time	0.2	-0.03	0.23	-0.16	0.63	-0.8	0.44	0.26	-0.45	0.59	-0.29				
Max. abs. amplitude time	0.05	-0.12	-0.01	-0.26	0.23	-0.03	-0.02	0.1	0.02	0.18	0.58	0.18			
S/N Ratio	-0.66	-0.89	-0.77	-0.75	0.2	0.14	-0.85	-0.89	-0.56	0.34	0.13	-0.1	0.15		
Resolving power	0.73	0.86	0.86	0.63	0.15	-0.41	0.89	0.9	0.3	0.05	-0.11	0.39	-0.01	-0.87	

Рисунок 53 – Окно контроля коэффициентов корреляции (красным и синим выделены значения устойчивой корреляции превышающие заданные значения)

Для более глубокого анализа зависимостей графиков сейсмических атрибутов добавлена возможность построения кросс плотов (Рисунок 54) с возможностью расчета линий тренда. Для расчета трендов используется несколько формул: линейная, полиноминальная, экспоненциальная и гиперболическая.



Рисунок 54 – Окно анализа сейсмических атрибутов (кросс плоты)

Выходными данными являются графики и разрезы ССА, которые отстраиваются с помощью программы Surfer [39] (или аналогичных).

#### 5.3 Результаты атрибутного анализа

Обычно прогнозную оценку исследуемого геологического параметра вычисляют по величине сейсмического атрибута, используя уравнение простой линейной регрессии. В нашем случае в качестве геологического параметра, для которого определяется прогнозная оценка, выступает наличие того или иного тектонического нарушения. Поэтому поиск корреляции производился между значениями атрибутов вдоль интересующего окна, и так называемыми графиками геологических неоднородностей (модель), принимающими значение 1 в случае наличия геологического нарушения и 0 в случае отсутствии. В программе AtAn данная схема расчета называется «расчет от модели».

Связь между сейсмическими атрибутами является устойчивой если коэффициент корреляции превышает 0,6, тогда соответствующий атрибут принимался в дальнейший расчет, если нет – исключался из расчетов. Выбранные атрибуты нормировались и суммировались в суммарный сейсмический атрибут

(CCA), который гораздо более устойчив в плане чувствительности к искомым геологическим нарушениям.

Для обоснования правил суммирования сейсмических атрибутов автор исследований основывался на результатах расчетов стандартного отклонения и физическом понимании причин изменения атрибутов волнового поля. В рамках исследуемого разреза было вычислено стандартное отклонение по графику ССА для разных представлений о влиянии аномального объекта на те или иные атрибуты. Стандартное отклонение служит мерой того, насколько широко разбросаны значения относительно среднего, таким образом, чем больше среднеквадратическое отклонение при выбранных параметрах, тем в более широком диапазоне изменяются значения ССА относительно среднего.

По результатам атрибутного анализа теоретических волновых полей, полученных на основе решения прямой задачи построена сводная таблица (Таблица 2), которая отражает влияние присутствующей тектонической дислокации на изменение значений сейсмических атрибутов. Часть атрибутов реагирует на неоднородности одного типа разных размеров разнонаправленно (положительно «+» или отрицательно «-»), что в итоге можно оценить, как отсутствие корреляции. Есть атрибуты, которые реагируют относительно закономерно (положительно «+» или отрицательно «-»). Любой из атрибутов реагирует на неоднородность только в некоторых случаях (при определенных размерах и структурных особенностях), в остальных – не реагирует. В результате, появилась возможность выбрать устойчиво реагирующие атрибуты, и объединить их в различные ССА, характерные для определенных типов тектонических дислокаций, встречающихся на Верхнекамском месторождении солей [30, 33].

Необходимо отметить, что, исходя из результатов регрессионного анализа, каждому типу геологической неоднородности соответствует свой ССА, который может быть не похож на ССА для выделения неоднородностей других типов, и даже неоднородностей одного типа, но разных размеров. Безусловно, из общего числа атрибутов можно выделить и наиболее чувствительные атрибуты, но это

## Таблица №2 – Сводная таблица отражающая влияние отдельных атрибутов на присутствие тектонических дислокаций

№ п/п	Геологическая неоднородность (см. таблицу 1)	№п/п	Peak Frequency	Centr oid Frequ ency	Appar ent freque ncy	Visibl e Frequ ency	Band width	Peak amplit ude	Throu gh amplit ude	Max. abs. amplit ude	RMS amplit ude	Pick amplit ude	Peak amplit ude time	Throu gh amplit ude time	Max. abs. amplit ude time	S/N Ratio	Resol ving power
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
		1	3	3			5				2		2	8 9			
		2		3		-		2	;;	2	a	2	33	2 2	8	;	
		3	13	3			į			2	2 2	2	3	2 2	c2	· · · · · ·	
		4	3	3	2		s	2	;;	2	2 —	2	3	22	. <u> </u>	. <u> </u>	·
	4	5	18	-3	2		6 3 1	3	2	2	2 2	2	2	2 2	c 9	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	c3
	1	6	- 2	1	0		2				2 2	3	3 3	2 2	8	5 - 5	1
	1	/	15	v +	-	2		8 3 1	3	1 3 1	8 2	2 2	2 2	8 2	6	6 S	+
		8	13	3	8	2		4	2	8	2 2	8	3 3	8 8	6 8	ss	c;
		10			2	2	2		2			2	2 3	2 2	s — 9	6	
	Зона замешения	11		+			-	-		-	-			8 8	6		+
82		12	12 17	N2 00													
1	продуктивного пласта	13		x								· · · · ·	· · · · ·				
	каменной солью	14	3	-		-		-		-		2 2	· ·	. J			-
	0.0100-1003-000-000-000-000-000-000-000-00	15	- 3	3		-		-	-	-		+		2			-
		16	3				ş				8	+		8 8	c 8	s	
		17		16			2	2		2		3	3	2 2	t 2		6 3
		18	13	+		8	3	2	÷	2		2	2 2	2 2	c 2	ss	+
		19	3	+		+	+		+			-	· · · · · · · · ·	2 2	s9	ss	+
		20	1	3	-	-	2	-	+	6			s	2 2	c 9	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
	,	21	-	<u> </u>					+	+			-				
		22	1 Sec. 1		-			+	+	÷							
		23		+	-			+	+	+		~					+
		24	0	-	2		4	+	+	+		12	s	ų – v			+
		25	+	-	-	-					+	-					
		26	- 2	2	-	-			-		-	-	+		+		
		27		+				~				2	+	+	+		+
		28				3			2				+	+	+		929
		29		3	-						-		+		+		
		30					0		+				+	6	+		
		31	+	1	-		-	-		-		+		2			
		32		1		1 (C)						+	+		+		
2	Зона складчатости	33	54 96	2. (2.		2				Ĵ.			+		+		
0.000	10 ×	34											+	+	+		
		35	8	2	-	-	¢	e	6	6	6	-	+		-	-	
		36		60			8	ŝ	¢			2					
		37				<u> </u>	ĺ.	Ĵ	Ĵ		2	12					
		38			-	-	1			Č.							
		30		÷			+	+		+			+		+		
		40		ŝ	0		372 1	+		+	8 8	2 3	+	6	+		
	10	40	1	-	-		-	+	+	+	+		4	+	4		1982
40 B)		41	0	-	6	1		5 T	3 T -	- T	T	1	8 T 2	, <b>T</b>	· * ;	-	

## продолжение таблицы 2

№ п/п	Геологическая неоднородность (см. таблицу 1)	№п/п	Peak Frequency	Centr oid Frequ ency	Appar ent freque ncy	Visibl e Frequ ency	Band width	Peak amplit ude	Throu gh amplit ude	Max. abs. amplit ude	RMS amplit ude	Pick amplit ude	Peak amplit ude time	Throu gh amplit ude time	Max. abs. amplit ude time	S/N Ratio	Resol ving power
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
8 8		40	2	1. C	<u>a</u>	2	(L	+		+		-	4		+		· · · · ·
		41		-		2	-	+	+	+	+	-	+	+	+		-
		42	-	-	S	·		2	2	3	3	0	+		+		-
2 8		43			Č	-	1	ž.	1. 				+		+	-	
		44		-	2		à	10	0	1.0	10		e te i		8 15 1		8 8
		45	ŝi.	2	12	2		ŝ	6	6	6	ó i	ó i	¢ i	ŝ – – –	¢	÷
		46	-	-	-	-	-	2				<u>.</u>		<u>.</u>			<u>.</u>
		47	S	_	_	_	-	s	-	-			-	-	-	s	s
	C	48						ò.				3	2	-		8	
3	Симметричная	49	2.				10		<i></i>	10	10	c	C	C			8
2202	антиклинальная складка	50	2	s	2	8	82	2	2	8	8	6	c;	ç		s s	5
		51	1	1	-		6	8	16 	6	ić					2 - 2	8
		52					8. 4			e. 2							
		53		1	1	1		с. С.		+			2. 2.	5 6	2 2		
		54	2			Į	3		3		3	-		-			
		55			-								-	+	-		
		56			1		0X	2 2	+	2							
4	Симметричная	57	2		+	6	8		+	+	+		5				
120	синклинальная складка	58			+		~		+	+	+		+				
		59		<u> </u>	1	21	5	67. 12.	+	+	+		+	+	+		
		60									······································						
59504	Флексурная склалка	61					2 	:X	2	×	2						
5		62			1	1	10 10	10 10	96 2	10 17	-	-	l				
		63		2			2	4	2	2			2				
e3		64		2	3	<u>.</u>	6	s		6	1.11		()	-			
		65	8	+	2	2	8	3	3	8	+	+		2	2		+
0	Зона трещиноватости	67	2.	25	25	8	12	2	2	12	12	c	c	o		s	5 - 3
6 8		68	5.1			-	8		÷	8	e	-		ŝ.	ŝ		
		60	20 77	27	-	-	-	č.	č.	č.	č.	-		3	3	2	
7	Разрывное нарушение	70	1 4	1		2									-	-	-
583		71			j.	-	~	2 2	2 1 X	x.	2 2						
		72															-
	2	73				-	8	<i>8</i>	8	10 1	к 	e	e	с.			-
8	зона дрооления	74	51 1	.53 1	1	- HI		5	60 	65 	6: 	8	8	0	8	S (	

будет исключительно статистической оценкой, которая не дает оснований использовать данные атрибуты как универсальные, применимые для локализации любых неоднородностей.

Результатом атрибутного анализа стал набор ССА, чувствительных к тектоническим дислокациям определенного типа и размера. Каждый ССА характеризуется как своим набором атрибутов, так и правилами их объединения. Все результаты по конечно-разностному моделированию и атрибутному анализу, проведенному автором представлены в приложении А.

Приедем наиболее показательные и характерные для ВКМС модели с синтетическими данными и результатами атрибутного анализа. Для зон замещения продуктивного пласта каменной солью (Рисунок 55) атрибутный анализ показывает работоспособность лишь при мощности замещенного пласта 40 м. Сразу 6 атрибутов показывают чувствительность к неоднородностям такого типа и размеров. На практике зоны замещения столь большой мощности встречаются, но очень редко.



Рисунок 55 – Результат моделирования геологической неоднородности (зоны замещения с вертикальным размером 40 м, горизонтальными – 50, 100, 150 и 200 м); а – тонкослоистая модель среды, б – теоретический временной разрез, в – график ССА (Peak Frequency, Centroid Frequency, Peak amplitude, Through amplitude, Max. abs. amplitude, Pick amplitude, Resolving power)

Разрывные нарушения (Рисунок 56) и зоны дробления (Рисунок 57) различных размеров и углов наклона однозначно не фиксируются атрибутным анализом ни при каких размерах.



Рисунок 56 – Результат моделирования геологической неоднородности (разрывное нарушение, вертикальный размер 20 м, наклон 50°); а – тонкослоистая модель среды, б – теоретический временной разрез, в – график ССА (Peak Frequency, Centroid Frequency, Peak amplitude, Through amplitude, Max. abs. amplitude, Pick amplitude, Resolving power)



Рисунок 57 – Результат моделирования геологической неоднородности (зона дробления, вертикальный размер 40 м, наклон 50°); а – тонкослоистая модель среды, б – теоретический временной разрез, в – график CCA (Visible Frequency)



Зоны складчатости (Рисунки 58, 59) выявляются атрибутным анализом достаточно устойчиво, независимо от размеров складчатой области.

Рисунок 58 – Результат моделирования геологической неоднородности (зона складчатости, вертикальный размер 5 м, горизонтальный размер 10 м); а – тонкослоистая модель среды, б – теоретический временной разрез, в – график CCA (Peak Frequency, Centroid Frequency, Apparent Frequency, Visible Frequency, RMS amplitude, Pick amplitude, Resolving power)



Рисунок 59 – Результат моделирования геологической неоднородности (зона складчатости, вертикальный размер 40 м, горизонтальный размер 100 м); а – тонкослоистая модель среды, б – теоретический временной разрез, в – график CCA (Centroid Frequency, Peak amplitude, Through amplitude, Max. abs. amplitude, RMS amplitude, Pick amplitude, Peak amplitude time, Through amplitude time, Max. abs. amplitude time, Resolving power)

Проведенный анализ показывает, отдельные симметричные что антиклинальные складки выделяются атрибутным анализом лишь при амплитуде складок 5 м и горизонтальном размере 80 м (Рисунок 60) только двумя атрибутами волнового поля, и не идентифицируются при больших размерах. Представляется, некорректный результат, что это поскольку теоретически вероятность обнаружения неоднородностей геофизическими методами зависит от размеров искомого объекта прямо пропорционально. Скорее всего, это случайное совпадение, которое возможно при большом количестве моделей и низкой способности более коррелируются разрешающей метода, тем что С неоднородностью только два атрибута.



Рисунок 60 – Результат моделирования геологической неоднородности (складки в двухслойной среде, вертикальный размер 5 м, горизонтальный размер 10, 20, 40 и 80 м); а – тонкослоистая модель среды, б – теоретический временной разрез, в – график ССА (Centroid Frequency, Apparent Frequency, Visible Frequency, Bandwidth, Through amplitude, Max. abs. amplitude, RMS amplitude, Peak amplitude time, Through amplitude time, Max. abs. amplitude time) Отдельные симметричные синклинальные складки (Рисунок 61) фиксируются атрибутным анализом тремя атрибутами. Моделирование для синклинальных складок выполнено только для размеров с амплитудой 10 м, поэтому говорить об устойчивости атрибутного анализа в целом для данного вида неоднородностей нельзя.



Рисунок 61 – Результат моделирования геологической неоднородности (синклинальные складки в двухслойной среде, вертикальный размер 10 м, горизонтальный размер 10, 20, 40 и 80 м); а – тонкослоистая модель среды, б – теоретический временной разрез, в – график ССА (Centroid Frequency, Apparent

Frequency, Visible Frequency, Through amplitude, Max. abs. amplitude, RMS amplitude, Peak amplitude time, Through amplitude time, Max. abs. amplitude time)

Флексурные складки и зоны трещиноватости (Рисунок 62) однозначно не фиксируются атрибутным анализом ни при каких размерах.



(зона трещиноватости, раскрытие трещин 1 м, наклон 0°, 45°, 90°); а – тонкослоистая модель среды, б – теоретический временной разрез, в – график ССА (при наклоне 0° реагируют атрибуты: Centroid Frequency, RMS amplitude, Pick amplitude, Resolving power; при наклоне 45°, 90° – сейсмические атрибуты не

Рисунок 62 – Результат моделирования геологической неоднородности

реагируют на неоднородность)

Полученные результаты позволяют утверждать, что использование одной и той же матрицы параметров (или одного и того же ССА) как универсального средства для обнаружения любых тектонических нарушений является некорректным. В целом, атрибутный анализ в имеющихся геологических условиях проявляет низкую надежность, даже при использовании комплекса атрибутов. По сути, устойчиво, то есть одним ССА, фиксируются только протяженные зоны интенсивной складчатости. Остальные тектонические нарушения на основе изученных атрибутов однозначно выделить не представляется возможным.

По результатам интерпретации по моделям, рассчитанным с плоской волной были получены наборы сейсмических атрибутов, реагирующих на складчатость. После чего проведен анализ по моделям, полученным с помощью расчета сферической волны. В результате атрибутного анализа были построены разрезы ССА (Рисунок 63) для зон складчатости протяженностью 500 м с различным размером складок. На тонкослоистых сейсмогеологических моделях зона складчатости располагается на расстоянии от 500 до 1000 м, в интервале глубин 200–250 м, что на временном разрезе соответствует двойному времени пробега волны порядка 100–150 мс.

Атрибутный анализ для зоны складчатости с размерами складок по латерали 5 м и мощностью 10 м и 50х10 м, соответственно, не показал результата (Рисунки 63а и 63б). Вероятно, это связано с предельной вертикальной разрешающей способностью, которая оценивается порядка 15–25 м.

На разрезах ССА с присутствием зоны складчатости мощностью 30 м и 50 м (Рисунки 63в, 63г и 63д), с горизонтальными размерами 15 м, 30 м и 50 м появляется аномальная область в начале профиля, которая с увеличением размеров складок увеличивается. Зона складчатости отражается на разрезах ССА низкими значениями, что не соответствует представлениям, выявленным по моделированию с плоской волной. Увеличение размеров складок в зоне складчатости до 100 м по латерали и 150 м в вертикальной плоскости показали, что аномалия на разрезах ССА уменьшилась в размерах по отношению к складкам 30х50 м.



Рисунок 63 – Разрезы значений ССА для зоны интенсивной складчатости протяженностью 500 м, с горизонтальными и вертикальными размерами складок: а – 5x10 м, б – 50x10 м, в – 15x30 м, г – 30x30 м, д – 50x50 м, е – 100x150 м

Вероятнее всего, это связано с выбором окна расчета атрибутов. Тем самым, можно предположить, что с увеличением размеров неоднородностей необходимо расширять окно атрибутного анализа с целью полноценной фиксации аномального влияния от неоднородности. Таким образом, выводы по второму этапу атрибутного анализа по синтетическим данным рассчитанным на основе сферической волны являются своего рода теоретической апробацией результатов, полученных при моделировании плоской волны. Результаты указывают на то, что выбранные атрибуты реагируют на зону интенсивной складчатости.

Использование сейсмических атрибутов для повышения надёжности и объективности выделения сейсмических аномалий можно считать перспективным. Поскольку данная методика интерпретации применена впервые на Верхнекамском месторождении солей, для ее совершенствования исследования будут продолжены.

#### ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5

В основе предлагаемой методики выделения тектонических нарушений в условиях Верхнекамского месторождения солей лежит атрибутный анализ, поскольку выделить отдельные отражения границ тонких OT слоев В малоконтрастной толщи практически невозможно, но суммарный вклад пачек в интерференционную волновую картину может быть значительным. Этот вклад особенностях сейсмической проявляется в таких рисунка трассы. как относительная амплитуда того или иного экстремума, своеобразие формы колебаний, изменение их видимого периода, частоты и др.

Для оптимизации процесса работы с сейсмическими атрибутами автором разработано программное обеспечение AtAn, которое позволяет проводить корреляционный анализ атрибутов по нескольким расчетным схемам [30, 33]. По результатам атрибутного анализа теоретических волновых полей, полученных на основе решения прямой задачи построена сводная таблица отражающая влияние геологического нарушения на значения сейсмический атрибутов. Часть атрибутов реагирует на неоднородности одного типа разных размеров разнонаправленно (положительно «+» или отрицательно «-»), что в итоге можно оценить, как отсутствие корреляции. Есть атрибуты, которые реагируют относительно закономерно (положительно «+» или отрицательно «-»). Любой из атрибутов реагирует на дислокацию только в некоторых случаях, в остальных – не реагирует. В результате, появилась возможность произвести отбор относительно устойчиво работающих атрибутов, и объединить их в различные ССА, характерные для выделения тектонических нарушений.

Исходя из результатов регрессионного анализа установлено, что каждому типу тектонической дислокации соответствует свой ССА, который может быть не похож на ССА для выделения неоднородностей других типов, и даже неоднородностей одного типа, но разных размеров. Использование сейсмических атрибутов для повышения надёжности и объективности выделения сейсмических

аномалий можно считать перспективным. Данная методика интерпретации применена впервые на Верхнекамском месторождении солей.

Результатом атрибутного анализа стал набор ССА, чувствительных к нарушениям определенного типа. Каждый ССА характеризуется как своим набором атрибутов, так и правилами их объединения. Для зон замещения пласта каменной атрибутный продуктивного солью анализ показывает работоспособность лишь при мощности замещенного пласта 40 м. Зоны складчатости выявляются атрибутным анализом достаточно устойчиво тремя атрибутами, независимо от параметров складчатости. Отдельные симметричные антиклинальные складки обнаруживаются атрибутным анализом лишь при амплитуде складок 5 м двумя атрибутами, и не обнаруживаются при большей амплитуде. Отдельные симметричные синклинальные складки фиксируются атрибутами. атрибутным анализом тремя Флексурные складки. зоны трещиноватости, разрывные нарушения и зоны дробления не фиксируются атрибутным анализом ни при каких размерах. Полный перечень расчетов по разработанной автором методике выделения тектонических нарушений представлен в приложении А.

Полученный результат позволяет утверждать, что использование одной и той же матрицы параметров (или одного и того же CCA) как универсального средства для обнаружения геологических неоднородностей некорректно. Более того, атрибутный анализ в имеющихся геологических условиях проявляет низкую надежность, даже при использовании комплекса атрибутов. По сути, устойчиво, то есть одним ССА, фиксируются только протяженные зоны складчатости. Остальные неоднородности на основе изученных атрибутов надежно выделить не представляется возможным.

Таким образом, четвертое защищаемое положение можно сформулировать следующим образом: «Разработана методика динамической интерпретации данных малоглубинной сейсморазведки, основанная на регрессионном анализе сейсмических атрибутов, позволяет изучать особенности геологического строения соляной толщи и выделять тектонические нарушения».

#### ГЛАВА 6. АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ

Опытно-методические работы с целью апробации предлагаемой методики выделения тектонических нарушений проведены автором по одной профильной линии. B целом. качество выделения границ В целевом интервале удовлетворительное. В результате обработки по опытному профилю получены глубинные разрезы ОГТ (Рисунки 64в, 64в). Отражения на полученном разрезе прослеживаются не настолько устойчиво, как ожидалось, несмотря на увеличение мощности источника более чем в 60 раз за счет использования энергии взрыва 200 г аммонита. Основной недостаток опытного профиля – преобладание песков в приповерхностной части разреза в начале 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.

Таким образом, значительно повысить качество отображения геологического строения среды и надежность геологических выводов с помощью одного только увеличения мощности источника колебаний бывает недостаточно. Причинами, по мере убывания степени влияния, являются: слабая акустическая контрастность границ в соляной толще, поверхностные условия возбуждения и приема колебаний, присутствие неконсолидированной толщи пород в ВЧР, наличие интенсивных природных волн-помех. Техногенные шумы на полевых сейсмограммах практически не отмечается, уровень микросейсм минимален, что можно связать с высокой мощностью источника колебаний.

Поведение отражающих границ можно охарактеризовать как субгоризонтальное, абсолютные отметки границ изменяются относительно в небольшом интервале. Всего прослежено две отражающих границы – кровля ПП и МГ. Внутри указанного интервала дополнительных границ не прослеживалось, поскольку поведение осей синфазности неустойчиво, оси зачастую прерываются, разделяются и соединяются, и надежность прослеживания будет минимальной, за исключением участков в непосредственной близости от скважин.



Рисунок 64 – Результаты обработки и интерпретации по опытному профилю (а – абсолютные отметки рельефа, б – статические поправки, в – глубинный разрез ОГТ с нанесенными ОГ, г – график ССА (набор атрибутов для складчатости))

Граница, ассоциируемая с кровлей ГАТ, выделяется на разрезах четко, что оказывает значительную помощь в выяснении общего характера залегания соляной толщи. Данная граница не прослеживалась на разрезах, поскольку все скважины пробурены до глубины, меньшей кровли ГАТ, но учитывалась при прослеживании ОГ кПП и МГ. Абсолютные отметки ОГ кПП на опытном профиле изменяются от

-165 до -140 м, отметки ОГ МГ от -275 до -295 м. Визуально выделить нарушения структуры волновой картины довольно сложно, поскольку качество разрезов в целом невысокое, и такое выделение будет в большой степени субъективным.

Для апробации предлагаемой методики выделения тектонических нарушений на опытном профиле проведена динамическая интерпретация, в ходе которой выполнен атрибутный анализ временных разрезов. Целевыми ОГ являются кровля кПП и МГ. Более подробное разбиение интервала ПП-МГ не выполнялось, поскольку внутри него отражения ведут себя нестабильно, часто прерываются и возобновляются вновь. Прослеживание целевых отражающих горизонтов выполнялась в системе RadExPro как по временным, так и по глубинным разрезам после предварительной привязки их к скважинам. Пикировка выполняется в полуавтоматическом режиме, когда интерпретатор прослеживает ОГ только в некоторых узловых точках профиля, а в каждой отдельной трассе система прослеживает горизонт самостоятельно, согласно параметрам, указанным интерпретатором, например, по максимальной или по минимальной амплитуде. Далее полученная пикировка сглаживается и сохраняется в базу данных проекта.

На следующем этапе вдоль пикировок в указанном окне проводится атрибутный анализ. Выявленный ССА для обнаружения признаков зон складчатости рассчитан для ОГ кПП и МГ. ОГ кПП представляет интерес с точки зрения целостности и полноты водозащитной толщи. ОГ МГ находится в зоне ведения подземных горных работ, поэтому особенности геологического строения в непосредственной близости от него влияют на проходку подготовительных и очистных выработок.

По полученным графикам (Рисунок 64г), прогнозируется наличие зон складчатости в строении соляной толщи 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.

#### ВЫВОД ПО ГЛАВЕ 6

В рамках опытно-методических работ, проведенных собственными силами Верхнекамского месторождения солей, апробации на участке с целью разработанной методологии, установлена работоспособность всех этапов производства сейсморазведочных работ, предлагаемых в диссертации.

Исследования на опытном полигоне проведены по предлагаемой технологии полевых работ с применением взрывного источника упругих колебаний с весом зарядов аммонита 200 г. На качество полевого материала и окончательных временных разрезов в первую очередь влияют поверхностные условия и неконсолидированная верхняя часть разреза. Опытный профиль характеризуется значительным перепадом отметок рельефа, преобладанием песков в поверхностной части разреза вдоль профиля наблюдений.

Визуально выделить нарушения структуры волновой картины сложно, поскольку качество разрезов в целом невысокое, и такое выделение будет в большой степени субъективным. Поэтому для отражающих горизонтов кровли переходной пачки (кровля солей или соляное зеркало) и пласта маркирующих глин рассчитан суммарный сейсмический атрибут, нацеленный на выделение зон складчатости, как единственный, который удалось обосновать по результатам моделирования. ОГ кПП представляет интерес с точки зрения целостности и полноты водозащитной толщи. ОГ МГ находится в зоне ведения подземных горных работ, поэтому особенности геологического строения в непосредственной близости от него влияют на проходку подготовительных и очистных выработок. Графики ССА для рассматриваемых профилей указывают на вероятность наличия зон складчатости в пределах пикетов от 1725 до 1800 м.

Таким образом, по предложенной автором методике интерпретации, основанной на атрибутном анализе, спрогнозировано наличие зон складчатости в строении соляной толщи. Комплексный анализ результатов атрибутного анализа и структурных особенностей залегания пластов ПП и МГ, различий в глубинах между этими пластами можно оценить полноту ВЗТ и выявить аномальные

области, связанные с геологическими процессами в соляной формации участка месторождения.

Использование сейсмических атрибутов для повышения надёжности и объективности выделения сейсмических аномалий можно считать перспективным. Поскольку данная методика интерпретации применена нами впервые на месторождениях калийных солей, для ее совершенствования и развития исследования будут продолжены.

Методология, предлагаемая в диссертации, может быть применена при поисках и разведке других месторождений твердых полезных ископаемых. Это связано с тем, что залегание целевого интервала, перспективного для отработки шахтным способом, в большей части характерно для глубин до 1200 м, что условно относится к интервалу малых глубин. Зачастую, условия проведения работ очень схожи. Это и сильные изменения рельефа местности, и присутствие неконсолидированных пород в верхней части разреза и малый акустический контраст между рудной залежью, рудовмещающими породами и покрывающими и подстилающими толщами.

Основной идеей работы является использование при проведении малоглубинной сейсморазведки взрывного источника упругих колебаний, что позволит получить исходные материалы высокого качества. Сейсмическое моделирование на основе данных акустического каротажа, вертикального сейсмического профилирования ИЛИ псевдоакустического каротажа при проектировании сейсморазведочных работ на новом участке является обязательным этапом производства работ, который позволит избежать грубых ошибок при выборе параметров системы наблюдений, при обработке и интерпретации сейсморазведочных данных. Применение источников с высокой энергией исключает применение процедур обработки нацеленных на вытягивание сигнала и повышение его когерентности. Атрибутный анализ волновой картины на основе синтетических данных позволяет определять перспективность сейсморазведки для локализации различного рода тектонических нарушений, рудных залежей или других неоднородностей в геологическом строении.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты исследований по теме диссертации 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.

Предлагаемая в диссертации методология малоглубинной сейсморазведки внедрена в процесс разведочных работ на Верхнекамском месторождении солей.

### СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АА – атрибутный анализ;

АБ – основной промышленный пласт Верхнекамского месторождения солей;

- АК акустический каротаж;
- АО акционерное общество;
- БКПРУ Березниковское калийно-промышленное рудоуправление;
- ВВ взрывчатое вещество;
- ВЗТ водозащитная толща;
- ВКМС Верхнекамское месторождения солей;
- ВСП вертикальное сейсмическое профилирование;
- ВЧР верхняя часть разреза;
- ГАТ глинисто-ангидритовая толща;
- ГИС геофизические исследования скважин;
- ГСМ горизонтально-слоистая модель;
- ДРК динамические разновидности каменной соли;
- ЗМС зона малых скоростей;
- Кр красный сильвинитовый пласт;
- МГ маркирующая глина;
- МОВ метод отраженных волн;
- МОГТ методика общей глубинной точки;
- НИЛ научно-исследовательская лаборатория;
- ОГ отражающая граница;
- ОГТ общая глубинная точка;
- ООО общество с ограниченной ответственностью;
- ОПВ общий пункт возбуждения;
- ПАО публичное акционерное общество;
- ПВ пункт возбуждения;

ПВРО – способ шахтной сейсморазведки на поперечных волнах с разделением отражений;

ПдКС – подстилающая каменная соль;

ПКС – покровная каменная соль;

ПП – переходная пачка;

кПП – кровля переходной пачки;

ППр – пункт приема;

ПЦТ – пестроцветная толща;

РФСД – зоны разрывных и флексурно-складчатых деформаций;

C3 – соляное зеркало, первый по разрезу пласт каменной соли (от поверхности наблюдения);

СКРУ – Соликамское калийное рудоуправление;

СМТ – соляно-мергельная толща;

ССА – суммарный сейсмический атрибут;

ТДР – зона термодинамического разубоживания;

ТКТ – терригенно-карбонатная толща;

ТОО – трасса однократных отражений;

ФГАОУ ВО – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования;

ЭСМ – эффективная сейсмическая модель;

AVO - amplitude variation with offset;

NMO – normal move out;

Q – четвертичные отложения;

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ампилов, Ю. П. От сейсмической интерпретации к моделированию и оценке месторождений нефти и газа / Ю. П. Ампилов. – М.: ООО «Издательство Спектр», 2008. – 384 с.

2. Байбакова, Т. В. Комплексная интерпретация данных малоглубинной сейсморазведки при решении горнотехнических задач: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.16 / Байбакова Татьяна Викторовна. – Пермь, 2013. – 139 с.

 Бельтюков, Г. В. Инженерно-геологические условия разработки Верхнекамского месторождения калийных солей / Г. В. Бельтюков, Г. А. Максимович // Тр. I Всесоюз. конф. по инженерной геологии. – 1978.

4. Бембель, Р. М. Высокоразрешающая объемная сейсморазведка /
Р. М. Бембель. – Новосибирск: Изд. Наука, 1990. – 152 с.

5. Берзон, И. С. Сейсмические обменные отраженные волны / И. С. Берзон.
– М.: Изд. Рипол Классик, 2013. – 232 с.

6. Боганик, Г. Н. Сейсморазведка. Учебник для ВУЗов / Г.Н. Боганик,
И. И. Гурвич. – Тверь: Изд. АИС, 2006. – 744 с.

7. Бондарев, В. И. Основы сейсморазведки. Учебное пособие для вузов /
В. И. Бондарев. – Екатеринбург: Издательство УГГТА, 2003. – 332 с.

8. Бронников, Ю. А. Комплексное изучение изменений геологической среды
 Верхнекамского месторождения калийных солей. Проблемы комплексного
 изучения водозащитной толщи на месторождениях калийных солей /
 Ю. А. Бронников, Ю. А. Левицкий // Тез. докл. рег. сов-я. ГИ УрО АН СССР.
 – 1989.

9. 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»).

10. Ворошилов, В. А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020660506 Российская Федерация. Программа контроля и документирования полевых сейсморазведочных работ ЕЈ. 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»).

11. Голубев, Б. М. Строение соляной толщи Верхнекамского месторождения: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук / Борис Михайлович Голубев. – Пермь, 1972. – 30 с.

12. Ермаков, А. П. Введение в сейсморазведку. Учебное пособие / А. П. Ермаков. – Тверь: Изд. ГЕРС, 2012. – 160 с.

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.

14. Иванов, А. А. Верхнекамское месторождение калийных солей / А. А. Иванов, М. Л. Воронова. – Л.: Недра, 1975. – 219 с.

15. Потапова, О. А. Инструкция по сейсморазведке / О. А. Потапова. – М.: ГФУП ВНИИ Геофизика, 2003. – 149 с.

Копнин, В. И. Верхнекамское месторождение калийных,
 калийно-магниевых и каменных солей и природных рассолов / В. И. Копнин //
 Известия ВУЗов. Горный журнал: Уральское обозрение. – 1995. – № 6.

17. Кудряшов, А. И. Верхнекамское месторождение солей. 2-е изд. переработанное / А.И. Кудряшов. – М.: Изд. Эпсилон Плюс, 2013. – 368 с.

18. Методические рекомендации к «Указаниям по защите рудников от затопления и охране подрабатываемых объектов на Верхнекамского месторождении калийно-магниевых солей». – Пермь: ГИ УрО РАН, 2014.

19. Номоконова, В. П. Сейсморазведка. Справочник геофизика. В двух книгах / В. П. Номоконова. – М.: Изд. Недра, 1990. – 336 с.

20. Палагин, В. В. Сейсморазведка малых глубин / В. В. Палагин, А. Я. Попов, П. И. Дик. – М.: Недра, 1989. – 210 с.

21. Патент № 2709415 С1 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.

22. Пригара, А. М. Прогноз строения и свойств горного массива на основе сейсмомоделирования: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 25.00.16 / Пригара Андрей Михайлович. – Пермь, 2003. – 140 с.

23. 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»).

24. Пузырев, Н. Н. Временные поля отраженных волн и метод эффективных параметров / Н. Н. Пузырев. – Новосибирск: Изд. Наука, 1979. – 262 с.

25. Санфиров, И. А. Рудничные задачи сейсморазведки МОГТ / И. А. Санфиров. – Екатеринбург: УрО РАН, 1996. – 167 с.

26. Спасский, Б. А. Учет верхней части разреза в сейсморазведке /Б. А. Спасский. – Иркутск.: Изд-во Иркутск. ун-та, 1992. – 184 с.

27. Хаттон, Л. Обработка сейсмических данных. Теория и практика. Пер. с англ. / Л. Хаттон, М. Уэрдингтон, Дж. Мейкин. – М.: Мир, 1989. – 216 с.

28. Хмелевской, В. К. Основы геофизических методов: учебник для вузов / В. К. Хмелевской, В. И. Костицын. – Пермь: Перм. ун-т, 2010. – 400 с.

29. 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.

30. 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.

31. 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.

32. 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»).

33. 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.

34. 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.

35. Череповский, А. В. Наземная сейсморазведка нового технологического уровня. Издание второе, дополненное / А. В. Череповский. – М: ЕАGE Геомодель, 2017. – 252 с.

36. Monk, D. J. Survey Design and Seismic Acquisition for Land, Marine and In-between in Light of New Technology and Techniques / D. J. Monk // Society of Exploration Geophysicists. – 2020.

37. RadExPro. Пакет обработки сейсморазведочных данных. Руководство пользователя. – М: ООО «Деко-геофизика СК», 2021. – 465 с.

38. Sheriff, R. E. Encyclopedic Dictionary of Applied Geophysics, 4th Ed /R. E. Sheriff. – USA: Society of Exploration Geophysicists, 2002. – 442 c.

39. Surfer. 2D and 3D mapping, modeling, and analysis software. Руководство
пользователя. – USA: Golden Software [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://downloads.goldensoftware.com/guides.

40. Tesseral Pro. Многопараметрическая числовая среда для сейсмического моделирования, обработки, QC, планирования и интерпретации. Руководство пользователя. – Canada: Tesseral Technologies Inc. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.tesseral-geo.com/documentation/ru/tesseralpro.

41. Yilmaz, O. Seismic data analysis. Processing, inversion and interpretation of seismic data. Volume I / O. Yilmaz. – USA: Society of Exploration Geophysicists, 2001.
– 1028 c.

42. ZondST2D. Программа для двумерной обработки и интерпретации данных сейсмической томографии на преломленных волнах. Руководство пользователя. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://zond-geo.com/software/seismic/zondst2d.



(зона замещения, вертикальный размер 1 м, горизонтальный размер 50, 100, 150,

200 м); а - тонкослоистая модель среды, б - теоретический временной разрез, в -

график ССА (сейсмические атрибуты не реагируют на неоднородность)



(зона замещения, вертикальный размер 2,5 м, горизонтальный размер 50, 100, 150, 200 м); а - тонкослоистая модель среды, б - теоретический временной разрез, в -

график ССА (сейсмические атрибуты не реагируют на неоднородность)



Рисунок А.3 – Результат моделирования геологической неоднородности (зона замещения, вертикальный размер 5 м, горизонтальный размер 50, 100, 150, 200 м); а - тонкослоистая модель среды, б - теоретический временной разрез, в - график ССА (Centroid Frequency, Visible Frequency, Bandwidth, Peak amplitude, Through amplitude, Max. abs. amplitude, RMS amplitude, Pick amplitude, Resolving power)



Рисунок А.4 – Результат моделирования геологической неоднородности (зона замещения, вертикальный размер 10 м, горизонтальный размер 50, 100, 150, 200 м); а - тонкослоистая модель среды, б - теоретический временной разрез, в график ССА (Centroid Frequency, Visible Frequency, Bandwidth, Peak amplitude, Through amplitude, Max. abs. amplitude, RMS amplitude, Pick amplitude, Resolving





Рисунок А.5 – Результат моделирования геологической неоднородности (зона замещения, вертикальный размер 20 м, горизонтальный размер 50, 100, 150, 200 м); а - тонкослоистая модель среды, б - теоретический временной разрез, в график ССА (Centroid Frequency, Visible Frequency, Bandwidth, Through amplitude, DMS, amplitude, Dick amplitude, Deceluing neuror)

RMS amplitude, Pick amplitude, Resolving power)



Рисунок А.6 – Результат моделирования геологической неоднородности (зона замещения, вертикальный размер 40 м, горизонтальный размер 50, 100, 150, 200 м); а - тонкослоистая модель среды, б - теоретический временной разрез, в график ССА (Peak Frequency, Centroid Frequency, Peak amplitude, Through amplitude, Max. abs. amplitude, Pick amplitude, Resolving power)



модель среды, б - теоретический временной разрез, в - график CCA (Peak

Frequency, Centroid Frequency, Peak amplitude, Through amplitude, Max. abs.

amplitude, Pick amplitude, Resolving power)



(разрывное нарушение, вертикальный размер 20 м, наклон 90°); а - тонкослоистая модель среды, б - теоретический временной разрез, в - график ССА (сейсмические атрибуты не реагируют на неоднородность)



(разрывное нарушение, вертикальный размер 40 м, наклон 17°); а - тонкослоистая модель среды, б - теоретический временной разрез, в - график CCA (Peak Frequency, Centroid Frequency, Visible Frequency, Resolving power)



модель среды, б - теоретический временной разрез, в - график CCA (Visible

Frequency)



(разрывное нарушение, вертикальный размер 40 м, наклон 90°); а - тонкослоистая модель среды, б - теоретический временной разрез, в - график ССА (сейсмические атрибуты не реагируют на неоднородность)



Frequency, Resolving power)



Frequency)



Рисунок А.14 – Результат моделирования геологической неоднородности (зона складчатости, вертикальный размер 5 м, горизонтальный размер 10 м); а тонкослоистая модель среды, б - теоретический временной разрез, в - график ССА (Peak Frequency, Centroid Frequency, Apparent Frequency, Visible Frequency, RMS amplitude, Pick amplitude, Resolving power)



Рисунок A.15 – Результат моделирования геологической неоднородности (зона складчатости, вертикальный размер 5 м, горизонтальный размер 20 м); а тонкослоистая модель среды, б - теоретический временной разрез, в - график ССА (Apparent frequency, Visible Frequency, Through amplitude, RMS amplitude, Pick amplitude, Peak amplitude time, Max. abs. amplitude time)



Рисунок А.16 – Результат моделирования геологической неоднородности (зона складчатости, вертикальный размер 5 м, горизонтальный размер 40 м); а тонкослоистая модель среды, б - теоретический временной разрез, в - график ССА (Centroid Frequency, Apparent frequency, Visible Frequency, Through amplitude, RMS amplitude, Pick amplitude, Peak amplitude time, Through amplitude time, Max. abs. amplitude time, Resolving power)



Рисунок А.17 – Результат моделирования геологической неоднородности (зона складчатости, вертикальный размер 5 м, горизонтальный размер 100 м); а тонкослоистая модель среды, б - теоретический временной разрез, в - график ССА (Centroid Frequency, Visible Frequency, Peak amplitude time, Through amplitude time, Max. abs. amplitude time, Resolving power)



Рисунок А.18 – Результат моделирования геологической неоднородности (зона складчатости, вертикальный размер 10 м, горизонтальный размер 10 м); а тонкослоистая модель среды, б - теоретический временной разрез, в - график ССА (Apparent frequency, Visible Frequency, RMS amplitude, Pick amplitude, Peak amplitude time, Max. abs. amplitude time)



Рисунок А.19 – Результат моделирования геологической неоднородности (зона складчатости, вертикальный размер 10 м, горизонтальный размер 20 м); а - тонкослоистая модель среды, б - теоретический временной разрез, в - график ССА

(Through amplitude, Peak amplitude time, Max. abs. amplitude time)



Рисунок А.20 – Результат моделирования геологической неоднородности (зона складчатости, вертикальный размер 10 м, горизонтальный размер 50 м); а тонкослоистая модель среды, б - теоретический временной разрез, в - график ССА (Peak Frequency, Bandwidth, Peak amplitude, Max. abs. amplitude, RMS amplitude,

Pick amplitude)



Рисунок А.21 – Результат моделирования геологической неоднородности (зона складчатости, вертикальный размер 10 м, горизонтальный размер 100 м); а тонкослоистая модель среды, б - теоретический временной разрез, в - график ССА (Visible Frequency, Pick amplitude, Peak amplitude time, Max. abs. amplitude time)



Рисунок А.22 – Результат моделирования геологической неоднородности (зона складчатости, вертикальный размер 20 м, горизонтальный размер 20 м); а - тонкослоистая модель среды, б - теоретический временной разрез, в - график ССА

(Peak amplitude time, Through amplitude time, Max. abs. amplitude time)



Рисунок А.23 – Результат моделирования геологической неоднородности (зона складчатости, вертикальный размер 20 м, горизонтальный размер 50 м); а - тонкослоистая модель среды, б - теоретический временной разрез, в - график ССА

(Apparent frequency, Visible Frequency, Pick amplitude, Peak amplitude time,

S/N Ratio)



(зона складчатости, вертикальный размер 20 м, горизонтальный размер 100 м); а тонкослоистая модель среды, б - теоретический временной разрез, в - график ССА (RMS amplitude, Pick amplitude)



Рисунок А.25 – Результат моделирования геологической неоднородности (зона складчатости, вертикальный размер 20 м, горизонтальный размер 150 м); а тонкослоистая модель среды, б - теоретический временной разрез, в - график ССА (Visible Frequency, RMS amplitude, Pick amplitude)



Рисунок А.26 – Результат моделирования геологической неоднородности (зона складчатости, вертикальный размер 20 м, горизонтальный размер 200 м); а тонкослоистая модель среды, б - теоретический временной разрез, в - график ССА (Apparent frequency, Visible Frequency)



Рисунок А.27 – Результат моделирования геологической неоднородности (зона складчатости, вертикальный размер 40 м, горизонтальный размер 40 м); а тонкослоистая модель среды, б - теоретический временной разрез, в - график ССА (Peak Frequency, Visible Frequency, Bandwidth, Peak amplitude, Max. abs. amplitude,

Peak amplitude time, Max. abs. amplitude time)



Рисунок А.28 – Результат моделирования геологической неоднородности (зона складчатости, вертикальный размер 40 м, горизонтальный размер 75 м); а тонкослоистая модель среды, б - теоретический временной разрез, в - график ССА (Peak Frequency, Visible Frequency, Peak amplitude, Max. abs. amplitude, Peak

amplitude time, Max. abs. amplitude time)



Рисунок А.29 – Результат моделирования геологической неоднородности (зона складчатости, вертикальный размер 40 м, горизонтальный размер 100 м); а тонкослоистая модель среды, б - теоретический временной разрез, в - график ССА (Centroid Frequency, Peak amplitude, Through amplitude, Max. abs. amplitude, RMS amplitude, Pick amplitude, Peak amplitude time, Through amplitude time, Max. abs. amplitude time, Resolving power)



Рисунок А.30 – Результат моделирования геологической неоднородности (зона складчатости, вертикальный размер 40 м, горизонтальный размер 150 м); а тонкослоистая модель среды, б - теоретический временной разрез, в - график ССА (Peak Frequency, Centroid Frequency, Visible Frequency, Peak amplitude time, Max. abs. amplitude time, Resolving power)



Рисунок А.31 – Результат моделирования геологической неоднородности (зона складчатости, вертикальный размер 40 м, горизонтальный размер 200 м); а - тонкослоистая модель среды, б - теоретический временной разрез, в - график ССА

(Visible Frequency, Peak amplitude time, Max. abs. amplitude time, S/N Ratio)



Рисунок А.32 – Результат моделирования геологической неоднородности (складки в двухслойной среде, вертикальный размер 5 м, горизонтальный размер 10, 20, 40, 80 м); а - тонкослоистая модель среды, б - теоретический временной разрез, в - график ССА (Centroid Frequency, Apparent frequency, Visible Frequency, Bandwidth, Through amplitude, Max. abs. amplitude, RMS amplitude, Peak amplitude time, Through amplitude time, Max. abs. amplitude time)



(складки в двухслойной среде, вертикальный размер 10 м, горизонтальный размер

10, 20, 40, 80 м); а - тонкослоистая модель среды, б - теоретический временной

разрез, в - график ССА (Apparent frequency)



Рисунок А.34 – Результат моделирования геологической неоднородности (складки в двухслойной среде, вертикальный размер 20 м, горизонтальный размер 20, 40, 80, 160 м); а - тонкослоистая модель среды, б - теоретический временной разрез, в - график ССА (Apparent frequency, Peak amplitude, Through amplitude, Max. abs. amplitude, RMS amplitude, Pick amplitude, Peak amplitude time, Through amplitude time, Max. abs. amplitude time)



Рисунок А.35 – Результат моделирования геологической неоднородности (синклинальные складки в двухслойной среде, вертикальный размер 10 м, горизонтальный размер 10, 20, 40, 80 м); а - тонкослоистая модель среды, б теоретический временной разрез, в - график ССА (Centroid Frequency, Apparent

frequency, Visible Frequency, Through amplitude, Max. abs. amplitude, RMS amplitude, Peak amplitude time, Through amplitude time, Max. abs. amplitude time)


(флексурные складки, вертикальный размер 5 м, наклон 63,4°); а - тонкослоистая модель среды, б - теоретический временной разрез, в - график ССА (сейсмические атрибуты не реагируют на неоднородность)



(флексурные складки, вертикальный размер 10 м, наклон 63,4°); а - тонкослоистая модель среды, б - теоретический временной разрез, в - график ССА (сейсмические атрибуты не реагируют на неоднородность)



(флексурные складки, вертикальный размер 20 м, наклон 63,4°); а - тонкослоистая модель среды, б - теоретический временной разрез, в - график CCA (Centroid Frequency, Through amplitude, RMS amplitude, Pick amplitude, Resolving power)



(флексурные складки, вертикальный размер 30 м, наклон 63,4°); а - тонкослоистая модель среды, б - теоретический временной разрез, в - график CCA (Bandwidth)



(флексурные складки, вертикальный размер 40 м, наклон 63,4°); а - тонкослоистая модель среды, б - теоретический временной разрез, в - график ССА (сейсмические атрибуты не реагируют на неоднородность)





Рисунок А.41 – Результат моделирования геологической неоднородности

(зона трещиноватости, раскрытие трещин 1 м, наклон 0°, 45°, 90°); а тонкослоистая модель среды, б - теоретический временной разрез, в - график ССА (при наклоне 0° реагируют атрибуты: Centroid Frequency, RMS amplitude, Pick amplitude, Resolving power; при наклоне 45°, 90° сейсмические атрибуты не реагируют на неоднородность)