

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Пермский федеральный исследовательский центр
Уральского отделения Российской академии наук
(ПФИЦ УрО РАН)

На правах рукописи

Чугаев Александр Валентинович

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ПРАКТИКА
МАЛОГЛУБИННЫХ СКВАЖИННЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ
ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
ВОДОРАСТВОРИМЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**

Специальность 2.8.3

«Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика,
маркшейдерское дело и геометрия недр»

диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант:
профессор,
доктор технических наук
Санфиров И.А.

Пермь 2024

Оглавление

Введение.....	6
Глава 1. Современное состояние скважинных сейсмических исследований и направления развития	15
1.1. История скважинных сейсмических и акустических методов изучения массива горных пород	16
1.2. Современное состояние скважинных сейсмических исследований.....	17
1.2.1. Скважинные сейсмические исследования при поисках и контроле добычи углеводородов.....	17
1.2.2. Малоуглубленные и инженерные скважинные сейсмические исследования.....	18
1.3. Основные задачи сейсмического контроля породного массива	20
1.4. Характеристика особенностей сейсмогеологического строения месторождения солей, на примере Верхнекамского	23
1.5. Регистрация сейсмических данных, реальные и синтетические волновые поля	25
1.5.1. Аппаратурный комплекс возбуждения и регистрации колебаний ..	25
1.5.2. Полноволновое моделирование.....	26
1.5.3. Реальные волновые поля	30
1.6. Оценка разрешающей способности преломленных и отраженных волн при проведении скважинных исследований	33
1.6.1. Способы расчета объема Френеля сейсмической волны.....	36
1.6.2. Построение объема Френеля способом лучевого моделирования ..	38
Выводы по главе 1.....	40
Глава 2. Методические решения при проведении скважинных сейсмических исследований	42
2.1. Получение глубинного сейсмического разреза с помощью отраженных волн при межскважинном просвечивании	42

2.1.1. Анализ и цифровая обработка волнового поля межскважинного просвечивания	42
2.1.2. Построение скоростной модели среды	49
2.1.3. Миграция поля отраженных волн	52
2.1.4. Получение глубинного сейсмического разреза	56
2.1.5. Построение глубинного разреза по синтетическим данным.....	59
2.1.6. Моделирование объема Френеля отраженных волн	63
2.2. Головные преломленные волны при изучении околоскважинного пространства	65
2.2.1. Получение скоростной характеристики вдоль ствола скважины	67
2.2.2. Определение скорости в кровле солей.....	70
2.2.3. Проявление физико-геологических аномалий в скоростях головных волн.....	71
2.2.4. Суммирование головных волн.....	76
2.2.5. Получение глубинного сейсмического разреза с помощью преломленно-отраженных волн.....	82
2.2.6. Поиск субвертикальных зон трещиноватости с использованием головных волн в методе вертикального сейсмопрофилирования.....	86
2.2.7. Моделирование объема Френеля головных волн	96
2.3. Методические решения с применением единственной скважины	102
2.3.1. Скважинное профилирование ОГТ	103
2.3.2. Сейсмический каротаж при выполнении скважинного профилирования ОГТ	105
Выводы по главе 2.....	113
Глава 3. Разработка аппаратно-методического обеспечения скважинных сейсмических исследований на основе распределенных оптоволоконных датчиков	116
3.1. Амплитудно-частотный отклик распределенного акустического сенсора DAS со спиральной намоткой волокна	117

3.1.1. Диаграмма акустической направленности прямого оптоволокна .	118
3.1.2. Влияние угла намотки на эффективную базу приема кабеля	119
3.1.3. Влияние угла намотки на чувствительность кабеля	120
3.1.3. Частотные характеристики регистрируемого сигнала для прямого волокна	122
3.1.4. Зависимость амплитудно-частотных характеристик от угла падения волны.	123
3.1.5. Амплитудно-частотная характеристика спирального волокна.....	124
3.1.6. Радиус изгиба волокна, затухание оптического сигнала от угла намотки.....	128
3.2. Натурные эксперименты	130
3.2.1. Сравнение гидрофонов и кабеля с прямым волокном при проведении МСП.....	130
3.2.2. Сравнение гидрофонов и кабеля со спиральным волокном при МСП	136
3.2.3. Межскважинное просвечивание на малых расстояниях.....	144
3.2.4. Количественная оценка чувствительности оптоволоконных распределенных датчиков на основании данных межскважинного просвечивания	147
Выводы по главе 3.....	152
Глава 4. Практика применения скважинной сейсморазведки на месторождениях полезных ископаемых.....	154
4.1. Скважинный мониторинг аварийного участка шахтного поля Верхнекамского месторождения солей	155
4.1.1. Описание системы наблюдений	156
4.1.2. Получение скоростной модели объекта	157
4.1.3. Получение сейсмических изображений объекта	160
4.1.4. Мониторинговые наблюдения	164

4.1.4. Сквaziнный мониторинг породного массива с применением распределенных оптоволоконных акустических датчиков	167
4.2. Малоглубинные сквaziнные сейсмические наблюдения в зонах ускоренных оседаний.....	172
4.2.1. Примеры совместного применения ВСП и МСП для изучения причин волновой аномалии по данным наземной сейсморазведки	173
4.2.2. Обнаружение вертикальных зон трещиноватости в методе ВСП .	179
4.2.3. Поиск субвертикальных зон с помощью преломленных волн.....	184
4.2.4. Оценка достоверности скоростных характеристик, получаемых в инженерно-геологических скважинах на ВКМС	187
4.3. Контроль формирования ледопородного ограждения при строительстве шахтных стволов	189
4.3.1. Межскважинные исследования	190
4.3.2. Расчет мощности ледопородного ограждения	195
4.3.3. Сквaziнное профилирование ОГТ	199
4.4. Сквaziнные исследования в горных выработках	202
4.4.1. Вертикальное сейсмопрофилирование в горной выработке	202
4.4.2. Межскважинное сейсмическое просвечивание в шахте	205
Выводы по главе 4.....	207
Заключение	210
Список сокращений	213
Список обозначений	214
Список литературы	216

Введение

Актуальность темы диссертации

Скважинные сейсмические исследования являются одним из видов сейсмической разведки и предполагают регистрацию и возбуждение волнового поля во внутренних точках среды. Многолетнее развитие данного направления обусловлено в основном решением нефтепоисковых и нефтеразведочных задач. На сегодняшний день хорошо известны работы Гальперина Е.И., Теплицкого В.А., Шехтмана Г.А., Силаева В.А., Табакова А.А., Кузнецова В.М., Ленского В.А. и др. Этими исследователями глубоко проработаны теоретические аспекты и предложены методические решения скважинных сейморазведочных исследований залежей углеводородов.

Для малоглубинных скважинных исследований основные проблемы связаны с пространственной дискретизацией физико-геологической модели и вертикальной контрастностью разреза. В этом отношении крайне важны аппаратно-методические решения по переходу в сейсмоакустический диапазон регистрации изучаемого волнового поля при сохранении необходимой глубины проникновения.

Современное состояние аппаратного обеспечения повышает возможности скважинных исследований в условиях малых глубин и позволяет применять их для контроля состояния разрабатываемого породного массива. Основным преимуществом скважинных исследований является непосредственная близость к объекту изучения. По сравнению с наземными исследованиями волновое поле освобождается от фильтрующего воздействия рыхлых приповерхностных отложений, вследствие чего спектр регистрируемого сигнала существенно выше, а записи имеют более высокое отношение сигнал/шум.

На территории Пермского края расположено Верхнекамское месторождение солей (ВКМС) – стратегически значимый объект, крупнейшее месторождение калийных солей в Европе и второе по величине в мире.

Незначительная глубина калийной залежи (до 500 м) позволяет отнести сейсморазведочные методы его изучения к малоглубинным. Специфика обеспечения безопасной разработки месторождения заключается в сохранности водозащитной толщи (ВЗТ), разграничивающей промышленные пласты солей с вышележащими водонапорными горизонтами. В случае нарушения ВЗТ формируются водопроводящие каналы, что приводит к затоплению выработок с последующим образованием провалов на земной поверхности.

Скважинные сейсмические исследования преимущественно направлены на параметрическое обеспечение наземной сейсморазведки данными о скоростях упругих волн для исследуемых интервалов геологического разреза, как в пределах действующих шахтных полей, так и при расширении их границ. В то же время волновое поле скважинных сейсмических исследований содержит различные классы и типы волн, несущие дополнительную полезную информацию о состоянии массива в околоскважинном пространстве. Анализ отраженных и преломленных волн при межскважинном сейсмическом просвечивании (МСП) позволяет получать разрезы акустической контрастности, а также локализовывать вертикально-ориентированные зоны трещиноватости на уровне кровли ВЗТ и глубже.

Высокая степень повторяемости скважинных наблюдений повышает достоверность сейсморазведочного мониторинга упругих параметров различных интервалов разрабатываемого породного массива, а внедрение инновационных технологий позволяет реализовать его в онлайн-режиме.

Цель работы: разработка комплекса методических и технических решений, направленных на организацию многоволновых сейсмических исследований в скважинах для ориентированного изучения и мониторинга структурных и физических параметров разрабатываемого породного массива.

Основная идея работы

Построение детальной сейсмогеологической модели породного массива за счет изучения различных классов регулярных упругих волн, регистрируемых при проведении малоглубинных скважинных исследований.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Изучение особенностей волновых полей, регистрируемых при проведении скважинных сейсмических исследований с ограниченными лучевыми траекториями в условиях высококонтрастной тонкослоистой сейсмогеологической модели интервала водоупорных отложений.
2. Оценка разрешающей способности и пространственных возможностей отраженных и преломленных волн при изучении околоскважинного массива.
3. Формирование стратегии и графов обработки цифровых данных межскважинного просвечивания с целью декомпозиции волнового поля на основные составляющие: прямые, отраженные, головные и гидроволны.
4. Разработка способа миграции отраженных волн в межскважинном просвечивании в рамках сейсмогеологической модели водозащитной толщи Верхнекамского месторождения солей.
5. Разработка способов изучения и мониторинга породного массива в околоскважинном пространстве с помощью преломленных головных волн.
6. Разработка и внедрение аппаратурно-методических решений по организации скважинных сейсмических исследований на основе распределенных оптоволоконных систем регистрации.
7. Практическое опробование комплекса методов скважинных исследований породного массива в условиях интенсивного техногенного воздействия.

Основные защищаемые положения

1. Декомпозиция волнового поля скважинных сейсмических наблюдений на проходящие, преломленные, отраженные и гидроволны на основании комплексной интерпретации решений прямой задачи и результатов динамического и кинематического анализа волнового поля, с целью определения упругих свойств массива в межскважинном и околоскважинном пространстве с учетом объема первой зоны Френеля.
2. Методика цифровой обработки данных межскважинного просвечивания в условиях резкого положительного градиента скоростей распространения упругих волн, направленная на получение единого глубинного сейсмического разреза в том числе в интервале водозащитной толщи с учетом восходящих и нисходящих отражений на основе миграции и суммирования по методу общей глубинной точки.
3. Технология определения физических свойств и строения породного массива на основании изучения головных преломленных волн, регистрируемых в скважинах, путем накопления с последующим скоростным анализом их первых вступлений и миграцией преломленно-отраженных волн.
4. Способ контроля формирования ледопородного ограждения шахтных стволов, основанный на совместной интерпретации данных межскважинного просвечивания и сейсмического профилирования по методике общей глубинной точки в скважинах, позволяющий детализировать в околоствольном пространстве распределение вертикально-ориентированных отражающих элементов и оценивать их упругие параметры.
5. Скважинная система мониторинга на базе распределенных оптоволоконных акустических датчиков с применением прямого и спирального волокна в кабеле, заключающаяся в онлайн построении поля упругих параметров исследуемого интервала геологического разреза в пределах контролируемого участка шахтного поля.

Научная новизна выполненных исследований

1. Получено решение прямой задачи на основе лучевой сейсмоки с учетом скоростной модели среды и нарушения монотонности функции времени регистрации отражений от различных горизонтов, обеспечивающее возможность миграции точек отражения.
2. Предложен способ суммирования головных волн в системах наблюдений межскважинного сейсмического просвечивания (МСП) и вертикального сейсмического профилирования (ВСП), основанный на неизменности хода лучей вблизи приемной скважины, с последующим выделением вторичного поля преломленно-отраженных волн и построения глубинных сейсмоакустических разрезов, в том числе для обнаружения субвертикальных акустически контрастных объектов.
3. На основании моделирования эффектов конструктивной интерференции головных и отраженных сейсмических волн, регистрируемых при межскважинных просвечиваниях, выполнены построения объёма Френеля для различных комбинаций источников и приёмников в типичных сейсмогеологических условиях Верхнекамского месторождения калийных солей. Для преломленных и отраженных волн выполнены оценки пространственных возможностей и разрешающей способности скважинных сейсмоакустических методик.
4. Установлено, что на этапе смыкания ЛПО наблюдаются рефрагированные волны, распространяющиеся по высокоскоростному замороженному массиву, изучение которых дает представление о степени формирования ледопородного ограждения.
5. При проведении скважинного профилирования ОГТ, выполняемого в единственной скважине, показана возможность изучения продольных волн и гидроволн в идеологии акустического каротажа. Кратность определения скоростной характеристики на одном интервале может составлять от 20 до 40, кратность суммирования отраженных продольных волн – более 100, гидроволн – более 400.

б. На основании сравнения оптоволоконной акустической системы регистрации с базой приема 10 м и гидрофонов, для акустических сигналов в диапазоне частот 100-500 Гц получена оценка чувствительности, составляющая (-13 .. -15) дБ для прямого волокна и (-15 .. -17) дБ для спирального волокна относительно гидрофонов. Показано, что увеличение угла намотки спирального волокна снижает избирательную способность системы и сглаживает амплитудно-частотную характеристику как по частотам, так и по углам падения сейсмических волн.

Практическая ценность и реализация исследований

Применение полученных методических результатов возможно в практике скважинной сейсморазведки не только на месторождениях водорастворимых пород, но и в других областях, связанных с поиском и добычей полезных ископаемых, а также при инженерных изысканиях.

1. Технология выделения поля отраженных волн, их миграции и построения глубинного сейсмического разреза при межскважинном просвечивании повышает детальность сейсмогеологических заключений по сравнению с наземными наблюдениями и методиками ВСП, использующими только одну скважину.

2. Теория формирования и регистрации головных волн в вертикальных и субвертикальных скважинах расширяет интерпретационные возможности скважинных сейсмических методов.

3. Техника суммирования головных волн, образующихся на кровле солей при возбуждении упругих волн в скважинах обеспечивает получение глубинного сейсмического разреза в области существования преломленно-отраженных волн при межскважинном просвечивании и локализацию субвертикальных трещин в окрестностях скважин при вертикальном сейсмопрофилировании.

4. Комплекс сейсмического контроля при возведении шахтных стволов и туннелей, включающий межскважинное просвечивание и скважинную

методику многократных перекрытий, позволяет определять сплошность и толщину сформированного ледопородного ограждения с меньшими трудозатратами в сравнении с традиционным методом межскважинного акустического просвечивания, проводимого в замораживающих колонках.

5. Система скважинного онлайн-мониторинга для контроля состояния верхней части разреза в зонах опасных природных или техногенно-геологических процессов, а также оснований зданий и сооружений на подработанной территории.

Методология и методы исследований

При выполнении работы применялась стандартная методология сейсмических исследований: анализ волновых полей и классификация составляющих волнового поля; лучевое и полноволновое моделирование; эксперименты по регистрации сейсмоакустических данных с применением различных систем наблюдений; сравнение синтетических и реальных волновых полей; метод аналогий при разработке новых способов изучения массива; статистический анализ и обобщение полученных результатов, геологическая интерпретация сейсмических изображений.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается большим количеством экспериментальных скважинных сейсмических исследований, соответствием результатов, получаемых на основе математических решений, с численным моделированием, наземными сейсмическими исследованиями и другими априорными геолого-геофизическими данными.

Апробация и публикация работы

Основные результаты исследований представлены на конференциях: «Engineering Geophysics–2016», Анапа, 2016; «Engineering Geophysics–2017», Кисловодск, 2017; «Engineering Geophysics–2018», Almaty, 2018; «Инженерная и рудная геофизика–2019», Геленджик, 2019; «Инженерная и рудная геофизика–2020», Пермь, 2020; «Инженерная геофизика–2021»,

Геленджик, 2021; «Инженерная геофизика–2022», Геленджик, 2022; «ГеоСОЧИ-2022», Сочи, 2022; Научная сессия Горного института, Пермь, 2014, 2015, 2016, 2017, 2019, 2022, 2023; Всероссийская конференция по волоконной оптике», Пермь, 2023; «Optical Reflectometry, Metrology & Sensing», 2023, Пермь; «Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений», Москва, 2023; ГеоЕвразия-2024, Москва, 2024.

По теме диссертации опубликовано 38 работ, 18 относятся к международным системам цитирования (Scopus и WoS), 14 опубликовано в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК. Зарегистрировано 3 патента.

Исходные материалы и личный вклад автора

В диссертации представлены результаты исследований, проводившихся автором в период 2012-2024 гг. в Горном институте Уральского отделения Российской академии наук.

Содержание диссертации и защищаемые положения отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Автором лично выполнены теоретические разработки, предложены оригинальные методики, сформированы графы и алгоритмы программного обеспечения, реализующие процесс цифровой обработки данных. Автором лично выполнены математические расчеты и получены формулы, приведенные в работе, за исключением тех, на которые даны ссылки. Все полевые исследования проведены на первых этапах при участии, а в последствии под руководством автора.

Связь работы с крупными научными программами и темами

Диссертационная работа выполнена в соответствии с государственными планами научных исследований «ГИ УрО РАН», проводившихся в период 2012—2023 гг., по темам: «Сейсмическое обеспечение безопасности разно-масштабного техногенного воздействия на породный массив»

(регистрационный номер НИОКТР: 122012000401-7), "Моделирование волновых полей в квазипространственных системах наблюдений", регистрационный номер НИОКТР № 124020500029-1), а также с тематикой хоздоговорных работ с горными предприятиями ПАО «Уралкалий», ИООО «Славкалий». С 2012 по 2013 гг. исследования по теме диссертации были поддержаны и частично финансировались Российским фондом фундаментальных исследований, проект 12-05-31102мол_а «Информационное обеспечение полномасштабного изучения интерференционных полей разнородных упругих волн на подрабатываемых территориях», проект РФФИ №20-45-596032 «Оценка техногенного влияния горных работ на инженерно-активную зону урбанизированных территорий скважинными сейсморазведочными исследованиями», Российским научным фондом, проект РНФ №16-17-00101 «Разработка научно-обоснованной системы снижения рисков катастрофического затопления калийных рудников и минимизация негативных последствий аварий для урбанизированных территорий».

Благодарности

Автор выражает глубокую признательность д.т.н., профессору Санфинову И.А. за помощь в выборе научного направления и всестороннюю поддержку при подготовке работы; всему коллективу отдела Активной сейсмоакустики, в особенности Бабкину А.И., Ярославцеву А.Г., Тарантину М.В., Фаткину К.Б., Герасимовой И.Ю., Никифоровой А.И., Байбаковой Т.В., Семериковой И.И., Ахматову А.Е., Калашниковой М.М. за создание конструктивной рабочей атмосферы и плодотворные обсуждения; руководителям и сотрудникам полевых отрядов за труд и энтузиазм при проведении экспериментов в суровых выездных условиях; к.г.-м.н. Лисину В.П. за многолетнее сотрудничество, д.т.н. Горшкову Б.Г. за консультации по теории фотоники; учителям и преподавателям, открывшим дорогу в науку; родителям и семье за поддержку и терпение.

Глава 1. Современное состояние скважинных сейсмических исследований и направления развития

Скважинные сейсмические исследования подразумевают размещение источников и/или приемников упругих волн в скважине, что определяет специфическую геометрию систем наблюдений, принципиально отличающуюся от наземных исследований и, как следствие, существенно отличающийся набор результирующей информации об изучаемом массиве.

Традиционно геофизические исследования с помощью упругих волн по частотному составу делятся на *сейсмические*, при которых регистрируемые сигналы характеризуются частотами от единиц до первых сотен герц; *акустические* – от первых сотен до первых десятков тысяч герц и *ультразвуковые* с частотами в десятки тысяч герц и выше. Принципиального отличия между данными частотными диапазонами нет, меняются лишь масштабы исследований и проникающая способность упругих волн, поэтому зачастую в работе термины «сейсмический» и «акустический» используются в более широком смысле, выходя за рамки указанных частотных диапазонов. Специфика месторождений, на которых получен фактический материал, определяет неглубокое заложение исследовательских скважин, не более 200-250 м, что также способствует регистрации как сейсмического, так и акустического диапазонов.

По типу системы наблюдений скважинные сейсмические исследования делятся на три основных типа:

вертикальное сейсмическое профилирование (ВСП) когда задействованы одновременно земная поверхность и скважина;

межскважинное сейсмическое просвечивание (МСП), когда источники и приемники расположены в двух разных скважинах;

скважинный сейсмический каротаж, при котором источники и приемники расположены в одной скважине.

1.1. История скважинных сейсмических и акустических методов изучения массива горных пород

Развитие скважинных сейсмических методов тесно связано с наземными сейсмическими исследованиями и часто революционные достижения наземных методов вскоре реализовывались и в скважинных модификациях. Впервые идея скважинной сейсморазведки описана в патенте США №1240328 [Fessenden, 1917]. Изобретатель предлагает использовать в скважинах прямые, преломленные и отраженные волны, однако на практике данный патент не был реализован. Первые сейсмические измерения в скважине, по всей видимости, выполнены в 1927 г. в Канзасе по методике прямого ВСП [Шерифф, 1987, с. 40].

В дальнейшем скважинные сейсмические исследования развивались намного медленнее по сравнению с наземными методами. В работе [Barton, 1929] автор рассуждает о перспективах скважинных сейсмических методов, в том числе межскважинного просвечивания. В работе [McCollum, 1931] впервые описаны принципы ВСП для получения скоростных характеристик околоскважинного массива.

Работы 1930-50х годов в США в основном связаны с определением скоростей по прямой волне в методе ВСП [Dix, 1939, 1945]. Что касается межскважинного просвечивания, то после патента Фессендена следующие упоминания в литературе появляются в работах, посвященных изучению сейсмического импульса [Ricker, 1953] и затухания упругих волн [McDonal, 1958].

В Советском союзе первые скважинные исследования относятся к 1930-м годам [Воюцкий, 1937; Островский, 1937], и связаны с акустическим каротажем.

Систематическое развитие скважинной сейсморазведки в советском союзе началось в конце 50-х годов под руководством Е.И. Гальперина. В начале 1960-х годов разработан и опробован метод вертикального сейсмопрофилирования (ВСП). Гальпериным предложен и внедрен в практику

промысловой геофизики метод (ВСП) в нескольких модификациях [Гальперин, 1971; Гальперин, 1982; Гальперин, 1994]. Издание перевода книги Гальперина посвященной ВСП [Galperin, 1974] вызвало бурную реакцию в США и послужило мощнейшим толчком для изучения скважинной сейсмоакустики за рубежом. К ключевым достижениям в скважинной сейсморазведке относятся: уровенные наблюдения (ВСП МОВ) [Теплицкий, 1973], поляризационный метод (ВСП ПМ) [Гальперин, 1982], скважинное сейсмическое торпедирование [Силаев, 1983], электроискровой скважинный излучатель [Калинин, 1989] методика 3D ВСП [Шехтман, 1993]. В России подавляющая часть скважинных сейсмических исследований ориентирована на нефтегазовую отрасль и представлена по большей части различными модификациями ВСП [Шехтман, 1993; Табаков, 2006; Протасов, 2012; Кузнецов, 2013; Коротков, 2014; Шехтман, 2016; Ленский, 2019].

В качестве отдельного направления в середине 1980-х годов выделяется межскважинное сейсмическое просвечивание, первоначально выполнявшееся с целью получения скоростных характеристик [Карус, 1986; Justice, 1989], а после включавшее также получение сейсмических изображений [Smalley, 1992; Harris, 1992; Van Schaak, 1992; Rector, 1992; Lazaratos, 1992]. Данный подход успешно применяется в нефтегазовой [Yu, 2003; Antonelly, 2004; Wong, 2007] и рудной [Khalil, 1993; Findaly, 2007; Menu, 2018] скважинной сейсморазведке.

1.2. Современное состояние скважинных сейсмических исследований

1.2.1. Скважинные сейсмические исследования при поисках и контроле добычи углеводородов

При добыче нефти и газа основные задачи, стоящие перед скважинной сейсморазведкой сформулированы в работе [Ленский, 2019]. К ним относятся: сопровождение обработки и интерпретации данных наземной сейсмики, изучение геологического строения околоскважинного пространства и мониторинг разработки месторождений.

При сопровождении наземной сейсморазведки наиболее актуальными задачами являются определение скоростных параметров разреза [Мусатов, 2016] и стратиграфическая привязка отражений [Ленский, 2021]. Изучение геологического строения околоскважинного пространства является наиболее сложной задачей с точки зрения цифровой обработки данных и строится на изучении отраженных и кратно-отраженных волн с последующими миграционными преобразованиями для получения сейсмических изображений среды [Шехтман, 2015; Шехтман, 2016]. Мониторинг разработки месторождений скважинными методами включает как регулярные наблюдения классическими сейсмическими методиками ВСП, так и пассивные измерения в скважинах: мониторинг гидроразрыва пласта [Lopez-Comino, 2018; Шулаков, 2018; Verdon, 2020], скважинный микросейсмический мониторинг [Verdon, 2015; Ma, 2023].

Внедрение волоконно-оптических акустических сенсоров при поисках углеводородов в России отстает от мирового уровня. Первые публикации о проведенных скважинных работах с применением распределенных оптоволоконных акустических датчиков относятся к 2020 году [Судакова, 2020]. В последние годы количество публикаций об успешном применении технологии увеличивается [Тулапин, 2023; Акуленко, 2023]

1.2.2. Малоглубинные и инженерные скважинные сейсмические исследования

Инженерные сейсмические исследования, как правило, опираются на методические разработки, полученные при поисках и разведке углеводородов, и характеризуются, как правило, меньшей канальностью систем наблюдений, что связано с ограниченностью материально-технической базы при проведении инженерных изысканий. Скважинными сейсмическими исследованиями инженерных глубин занимались Горяйнов Н.Н., Савич А.И., Ляховицкий Ф.М., Калинин А.В., Калинин В.В., Владов М.Л., Гайнанов В.Г., Ошкин А.Н., Дорохин К.А., Рослов Ю.В., Каминский А.Е. и др.

В условиях малых глубин большее значение приобретают межскважинные исследования, что связано с повышением доли приповерхностной разуплотненной части массива в общей глубине скважин [Владов, 2002; Ошкин, 2016], что затрудняет проведение ВСП. Скважинные исследования инженерных глубин, как правило, ориентированы на получение скоростных распределений и физико-механических свойств в массиве, влияющих на устойчивость инженерно-активной зоны и, как следствие, сохранность зданий и сооружений. Для получения 2D скоростных распределений используется томография на прямых продольных волнах [Lebedev, 2019] и в некоторых случаях на поперечных волнах [Галушкин, 2021]; также в последнее время начинают применяться отраженные волны [Чугаев, 2022; Вязниковцев, 2023]. Формально к малоглубинным исследованиям можно отнести и шахтные межскважинные исследования [Голик, 2020].

Необходимо отметить, что при малоглубинных скважинных исследованиях практически не используются отраженные и преломленные волны. Опыт нефтяной скважинной сейсморазведки доказывает высокую информативность отраженных волн при межскважинных исследованиях. Что касается преломленных волн, то они в принципе не рассматриваются в качестве полезного сигнала и источника геолого-геофизической информации в современной литературе. Уравнения годографа головных волн при регистрации в скважинах для плоского и трехмерного вариантов приведены в работах [Гальперин, 1982; Ленский, 1983].

Методика получения глубинного сейсмического разреза на отраженных волнах при межскважинном просвечивании описана в серии статей [Smalley, 1992; Harris, 1992; Van Schaak, 1992; Rector, 1992; Lazaratos, 1992] и основана на картировании точек отражения на основании геометрии системы наблюдений и скоростной модели, полученной по данным томографии первых вступлений.

1.3. Основные задачи сейсмического контроля породного массива

Большая часть объектов практической реализации предлагаемых технологических решений относится к Верхнекамскому месторождению солей (ВКМС), крупнейшему в Евразии. Месторождения калийных солей, в особенности хлоридного типа (сложенные главным образом сильвинитом, карналлитом, галитом) занимают особое место среди месторождений, разрабатываемых шахтным способом. Это связано с их экстремально высокими скоростями растворения при контакте с пресными водами. За всю историю промышленной разработки соляных месторождений насчитывается несколько десятков аварий, произошедших в результате проникновения пресных грунтовых вод в выработанное пространство с последующим образованием провалов земной поверхности. Для предотвращения подобных явлений необходимо обеспечить сохранение сплошности так называемой водозащитной толщи (ВЗТ), которая условно принимается от верхних соляных пластов до кровли выработок.

Ключевую роль в изучении строения и последующем мониторинге состояния ВЗТ играют сейсмические методы и главным образом малоглубинная невзрывная сейсморазведка высокого разрешения по методике общей глубинной точки (МОГТ) в наземном и шахтном вариантах. Данный подход позволяет решать ряд задач: формировать представление о структурных особенностях исследуемого интервала породного массива [Санфиоров, 2016] и о распределении упругих свойств в его пределах [Санфиоров, 2013], на основании чего с учетом динамических характеристик волнового поля [Байбакова, 2009] картировать разного рода физико-геологические неоднородности. Комплексный анализ указанных факторов позволяет выделять проблемные для разработки участки месторождения, как в пространстве [Санфиоров, 2011], так и во времени [Барях, 2013].

Известны ограничения любых сейсморазведочных исследований. Разрешающая способность по горизонтали определяется радиусом первой зоны Френеля и зависит от длины волны и глубины точки отражения H

[Шериф, 1987; Завалишин, 2008]: $d_h = \sqrt{2H\lambda}$. Вертикальная разрешающая способность определяется только длиной волны и по разным оценкам может составлять от $\lambda/4$ до $\lambda/8$ [Widess, 1973; Chopra, 2006]. В наземной 2D сейсморазведке при частотах регистрируемого сигнала 60-120 Гц и глубинах 300-500 м возможно выделение контрастных по упругим свойствам объектов с примерными размерами 10x50x50 м.

Точность получения эффективных скоростей способом скоростного анализа по сейсмограммам существенно зависит от плавности изменения скоростных характеристик вдоль профиля, а также от апертуры, определяемой максимальными выносами [Шевченко, 2011; Ли, 2012]. А поскольку пластовые скорости определяются путем пересчета из эффективных скоростей по формуле Урупова-Дикса [Урупов, 1966], точность определения их абсолютных значений может составлять от ± 2 до $\pm 25\%$.

Отдельную сложность для наземной сейсморазведки представляет поиск субвертикально ориентированных акустических границ – их обнаружение возможно только по косвенным признакам, например, нарушение прослеживаемости осей синфазности и изменение динамических характеристик временного сейсмического разреза.

Скважинные сейсмические методы дополняют возможности изучения породного массива за счет более высокой разрешающей способности. Кроме того, возможно прямое измерение скоростей в массиве и поиск вертикальных и субвертикальных акустических границ, что наиболее актуально для месторождений водорастворимых полезных ископаемых. Возбуждение и регистрация упругих колебаний в скважинах позволяет избавиться от фильтрующего влияния рыхлой низкоскоростной приповерхностной толщи, что существенно расширяет частотный спектр. Это в свою очередь, дает возможность проектировать системы наблюдения, нацеленные на более детальное изучение отдельных объектов, выделенных с помощью наземных методик.

Основные задачи, решаемые скважинной сейсморазведкой, являются логичным продолжением и развитием задач, стоящих перед наземными сейсмическими методами и в общем виде могут быть сформулированы следующим образом:

- изучение упругих характеристик среды, их распределение в массиве и выделение участков с аномальными скоростями распространения упругих волн;
- изучение сейсмоакустических границ;
- выявление и локализация физико-геологических неоднородностей;
- изучение пространственно-временных изменений волнового поля (мониторинг состояния массива).

Изучение упругих характеристик среды

Данные об упругих характеристиках, в первую очередь о скоростях распространения упругих волн, могут использоваться для оценки механических свойств пород, и в качестве параметрического обеспечения при обработке наземных сейсмических данных. Наличие резких акустических границ в разрезе, волноводов, особых точек в рельефе сейсмических границ определяет специфику формирования и регистрации волновых полей.

Изучение сейсмических границ

Построение глубинных сейсмических разрезов позволяет выполнять литологическое расчленение массива, особенно в условиях пластового месторождения с субгоризонтальными границами. Потеря корреляции сейсмоакустических границ, или изменение динамических характеристик волновых полей может указывать на наличие дизъюнктивных нарушений в массиве. Наличие геологического расчленения в скважине позволяет однозначно сопоставить глубинные сейсмические разрезы наземных сейсмических методов и выполнить их сейсмостратиграфическую привязку.

Выявление и локализация физико-геологических неоднородностей

Регулярные системы наблюдений дают возможность локализации в массиве зон с аномальными значениями упругих характеристик, вызванных, например, разуплотнением или наличием трещин. В условиях месторождения водорастворимых полезных ископаемых это в первую очередь поиск участков, которые могут представлять опасность для проникновения пресных грунтовых вод к водозащитной толще, представленных соляными породами.

Изучение пространственно-временных изменений волнового поля

Скважинная сейсморазведка может использоваться для мониторинга пространственно-временных вариаций волнового поля, связанных с изменением напряженно-деформированного состояния породного массива под влиянием техногенных факторов при разработке месторождения.

1.4. Характеристика особенностей сейсмогеологического строения месторождения солей, на примере Верхнекамского

Типичный разрез на ВКМС представляет собой осадочные горные породы и характеризуется субгоризонтальной слоистостью. Наиболее контрастные сейсмоакустические границы связаны с геологическими границами основных слоев в разрезе (рисунок 1.1): четвертичного, пестроцветной толщи (ПЦТ), терригенно-карбонатной толщи (ТКТ), соляно-мергельной толщи (СМТ), переходной пачки (ПП), покровной каменной соли (ПКС), продуктивной толщи, состоящая из чередующихся сильвинитовых и галитовых пород (А, В, КрI, Кр2, КрII), а также прослоев карналлита. Дальше вниз по разрезу идет подстилающая каменная соль (ПдКС), в которой находится прослой маркирующей глины (МГ).

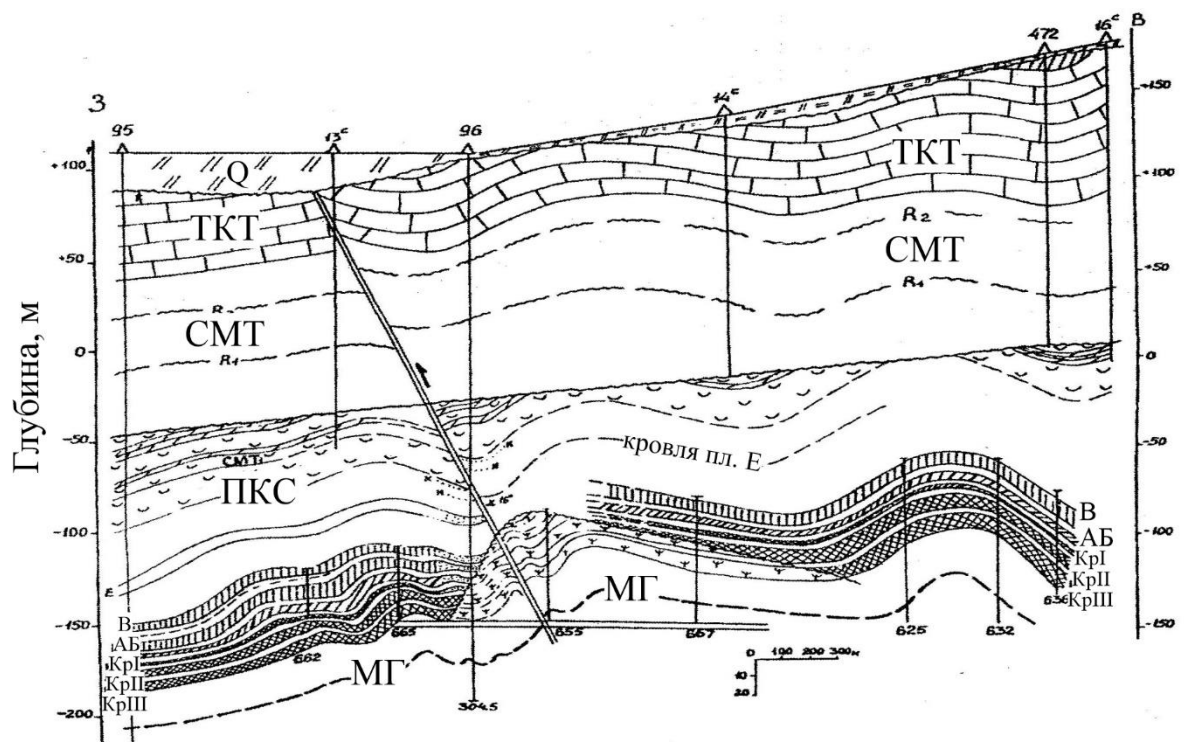


Рисунок 1.1 – Пример разреза соляной залежи при наличии складчатости и дизъюнктивных нарушений [Джиноридзе, 2000]

В терригенно-карбонатной (ТКТ) и соляно-мергельной толщах (СМТ) присутствуют высокоскоростные прослои гипса мощностью от нескольких сантиметров до первых метров.

В таблице 1.1 приведены краткие сведения о скорости и плотности геологических толщ, по материалам [Глебов, 2006].

Граница соляно-мергельной толщи, относящейся к терригенным осадочным породам и покровной каменной соли, образованной в условиях морского бассейна, является наиболее контрастной в рассматриваемом разрезе. Скорости продольных волн возрастают скачкообразно с 2200 до 4500 м/с. Большую роль здесь также играет высокая растворимость солей и их пластичность, которая способствует появлению особого рода контакта, известного как «соляное зеркало», и характеризующегося меньшим наклоном и степенью складчатости, чем выше и ниже лежащие породы.

Таблица 1.1 – Сейсмоакустические характеристики геологических слоев ВКМКС (по материалам [Глебов, 2006])

Толща	сокращение	V_P , км/с	V_S , км/с	Плотность, г/см ³
Четвертичная	Q	0.5-1.5	0.2-0.8	1.2-2
Пестроцветная	ПЦТ	1.2-2	0.5-1	1.6-2
Терригенно-карбонатная	ТКТ	1.5-2.5	0.6-1.2	2.4
Соляно-мергельная	СМТ	1.8-2.4	0.8-1.2	2.4
Гипсовые прослои	G	3-5.5	1.5-2.8	2.3
Переходная пачка	ПП	1.8-3.5	0.8-1.9	2.2-2.3
Покровная каменная соль	ПКС	4.3-4.6	2-2.5	2.15
Сильвинитовые слои	А,Б,В,Г,Д,Е	3.6-3.9	1.7-1.9	2
Карналлитовые слои	КрI, КрII	2.8-3.5	1.4-2	1.6
Маркирующая глина	МГ	1.8-2.3	0.9-1.4	1.8
Подстилающая каменная соль	ПдКС	4.3-4.8	2-2.4	2.15

1.5. Регистрация сейсмических данных, реальные и синтетические волновые поля

1.5.1. Аппаратурный комплекс возбуждения и регистрации колебаний

Большая часть исследований, описанных в работе, выполнена аппаратным комплексом, основными элементами которого являются электроискровой источник возбуждения колебаний с энергией 600-2500 Дж [Калинин, 1989; Владов, 2002; Чугаев, 2016] и наборы 24-х канальных гидрофонных пьезокерамических датчиков с шагом 1, 2 и 4 м. При наземном возбуждении упругих колебаний применяются классические наземные ударные [Бабкин, 2016] или импульсные [Санфиоров, 2011] источники возбуждения колебаний, а при наземной регистрации сейсмоприемники GS-20DX и GS-One. Цифровая регистрация осуществляется модульной сеймостанцией ИМ2416, производство Россия-Латвия.

Проектирование систем наблюдений выполняется с учетом традиционных требований, применяемых для интерференционных систем. Для многоволновых наблюдений есть ряд особенностей, в частности, требование минимального шага между приемниками, обеспечивающего

смещение сигнала на соседних трассах не более чем на половину длины волны. Это требование должно выполняться для всех целевых типов волн, к которым относятся прямые отраженные, головные и в отдельных случаях гидроволн. Несоблюдение данного условия приводит к пространственному алиасингу и существенно усложняет процесс цифровой обработки, особенно для высокочастотных данных.

Описываемые сейсмические материалы в большинстве случаев получены в гидронаблюдательных и геофизических скважинах, обсаженных пластиковой колонной (ПВХ) и заполненных водой или рассолом. При цифровой обработке материалов отраженных волн при межскважинном просвечивании важным условием является равенство шага пунктов приема ($X_{ПП}$) и возбуждения ($X_{ПВ}$).

1.5.2. Полноволновое моделирование

Регистрируемые реальные волновые поля в сейсмоакустике, как правило, имеют весьма сложную структуру и одним из наиболее эффективных способов анализа является полноволновое моделирование, основанное на решении волнового уравнения, описывающего распространение упругих волн [Петров, 2019]. Приведенные в работе модели рассчитаны с использованием коммерческого программного продукта «Tesseral Engineering», в основе которого лежит сеточно-характеристический метод на неструктурированных треугольных сетках [Квасов, 2012; Квасов, 2016].

Модель с плоскими границами. Рассмотрим пример полноволнового моделирования для простой слоистой модели с постепенным нарастанием скоростей вниз по разрезу (рисунок 1.2, 1.3). На одной из границ задано понижение рельефа, а нижняя граница имеет наклон порядка 3° .

На сейсмограммах наиболее интенсивными являются первые вступления, хорошо видны отраженные волны, которые пересекаются с годографом прямой волны на глубине залегания соответствующей границы. Из этой же точки берут начало еще два годографа, которые имеют все

признаки обменных волн – отраженной и проходящей PS волны. Регистрация поперечных волн датчиками давления физически невозможна, однако на реальных данных такие волны также присутствуют, и являются дважды обменной PSP волной [White, 1980; Бабкин, 2001; Кашубин, 2019].

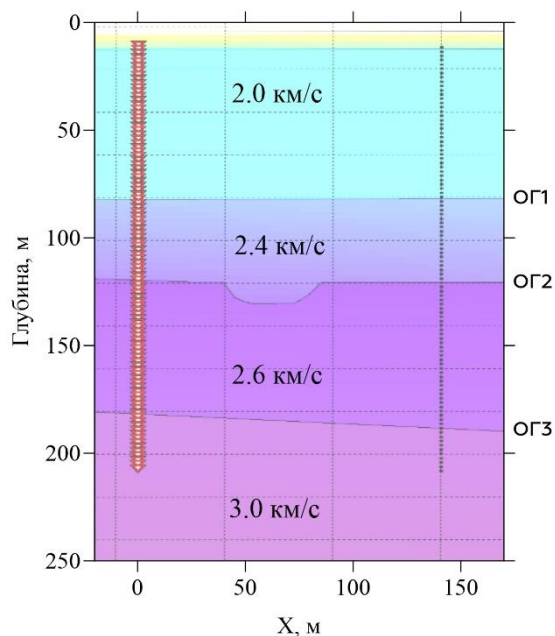


Рисунок 1.2 – Модель слоистой среды и схема расстановки системы наблюдений (Модель №1)

На сейсмограммах присутствуют отражения, приходящие как из верхней, так из нижней полуплоскости, относительно линии источник-приемник. Границы 1 и 2 плоские и заданы таким образом, что образуют угол 90° с линиями приема и возбуждения. Как следствие, на сейсмограммах отражения PP выглядят зеркальными отражениями прямой волны относительно вертикали. Небольшие различия наклонов объясняются различием скоростей в средах по разные стороны от границы.

В сортировке средней линии наблюдения (СЛН), где $Z_{СЛН}=(Z_{ПВ}+Z_{ПП})/2$, горизонтальным границам соответствуют субгоризонтальные годографы отраженных и преломленных волн, то есть каждую сейсмограмму можно рассматривать как однократный временной разрез, с той разницей, что здесь одновременно присутствуют отражения как из верхней, так и из нижней полуплоскостей.

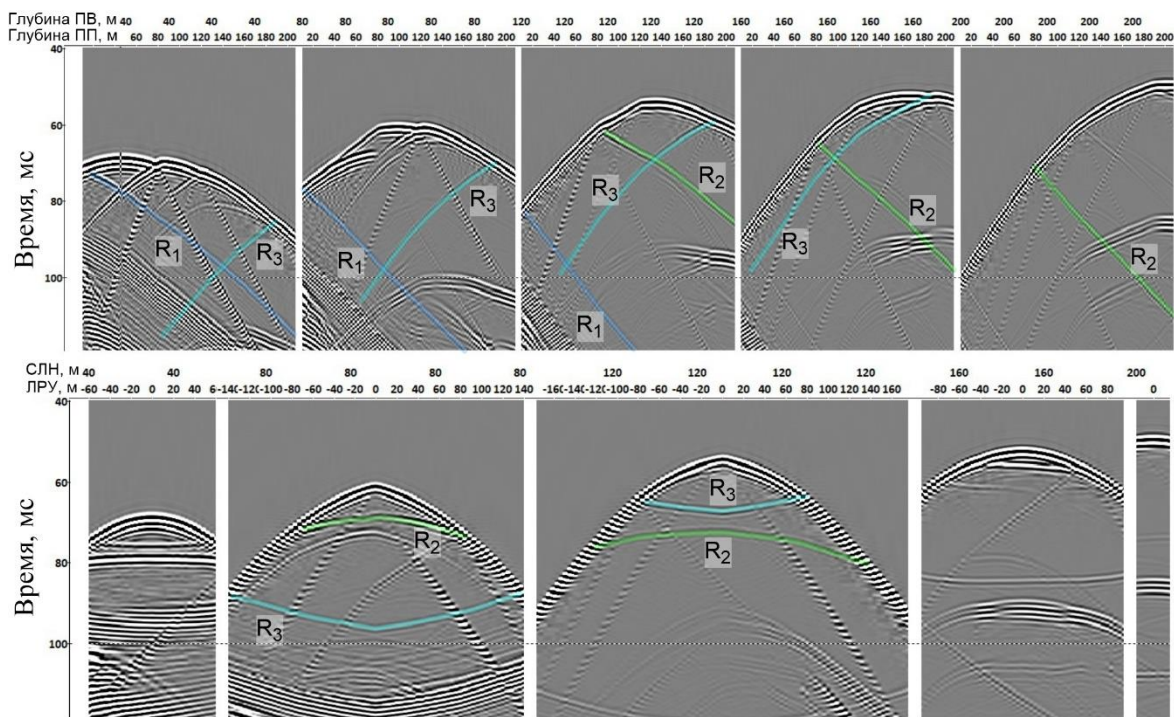


Рисунок 1.3 – Синтетические сейсмограммы для модели №1, а) сортировка общего пункта возбуждения, б) сортировка общей средней линии наблюдений (СЛН). R_1, R_2, R_3 – отражения от ОГ1, ОГ2, ОГ3. ЛРУ – линия равных удалений, $Z_{ЛРУ} = Z_{ПП} - Z_{ПВ}$.

Модель с резким скачком скорости.

Следующий вариант иллюстрирует конфигурацию волнового поля в условиях, приближенных к сейсмогеологической модели Верхнекамского месторождения, где соляная залежь перекрыта терригенными отложениями. По сравнению с предыдущей моделью имеется ряд отличий, в частности, отсутствует возрастание скорости с глубиной, а в нижней части модели расположен высокоскоростной слой, имитирующий соляную залежь (рисунок 1.4). В результате существенной разницы скоростей упругих волн, верхняя кровля соляных пород характеризуется высокой акустической контрастностью, что приводит к возникновению интенсивных преломленных головных волн. Благодаря высокой скорости в преломляющем слое головные волны в нижней части расстановки регистрируются раньше прямой проходящей волны (рисунок 1.5). Внутри соляной залежи задан промежуточный слой со скоростью продольных волн 3800 м/с, что

соответствует продуктивному пласту сильвинита. Отражения от этого слоя также приходят раньше прямой волны.

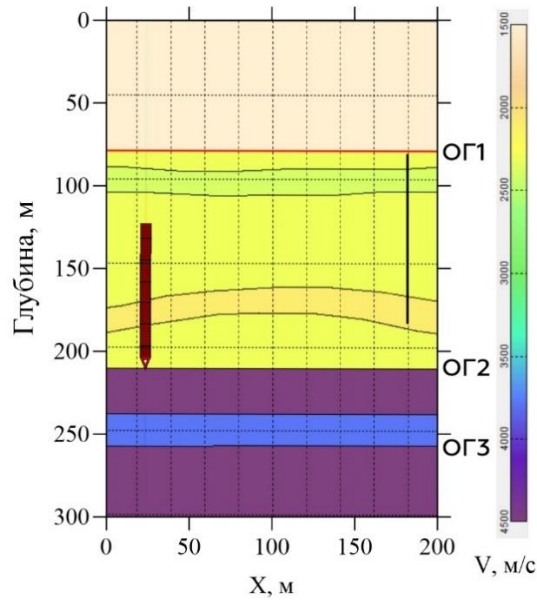


Рисунок 1.4 – Модель слоистой среды с присутствием резкой скоростной границы, соответствующая кровле соляной залежи (Модель №2)

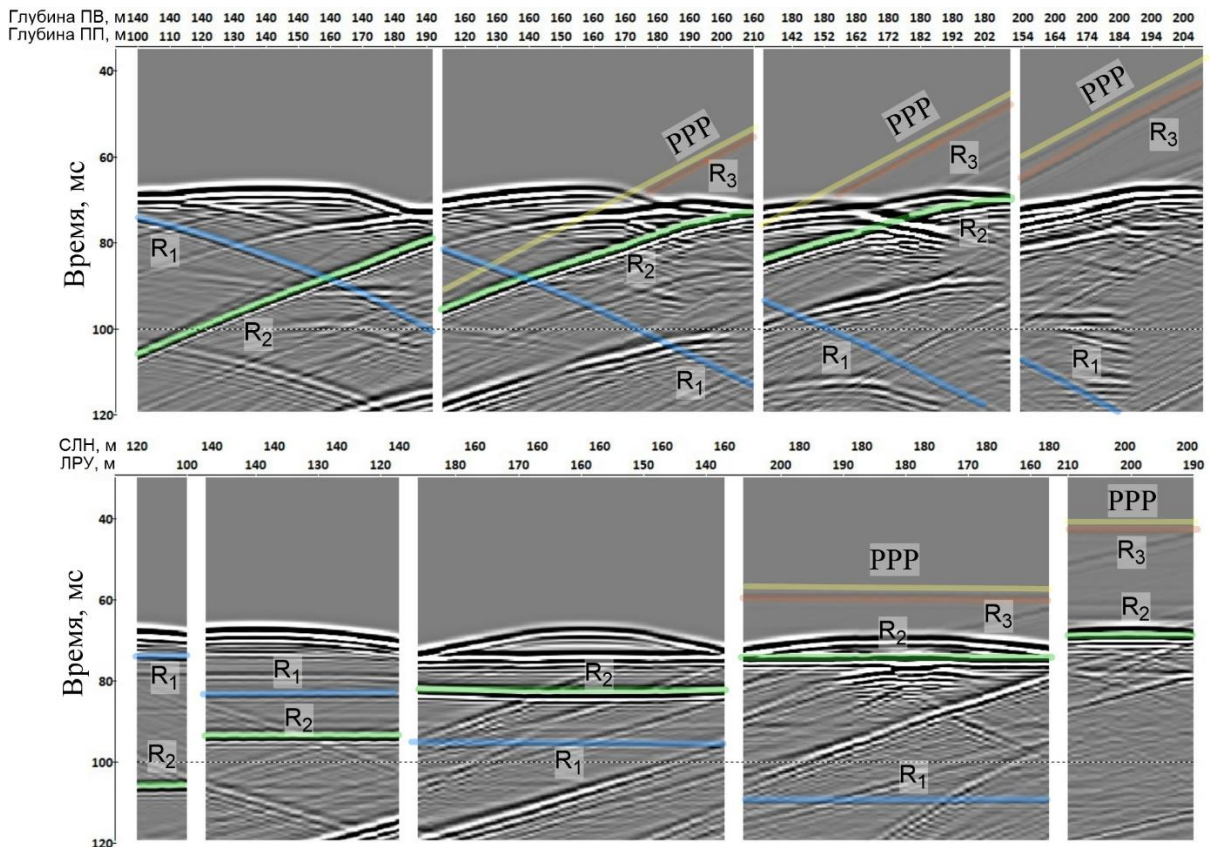


Рисунок 1.5 – Сейсмограммы полноволнового моделирования для модели №2, а) сортировка общего пункта возбуждения, б) сортировка общей средней линии наблюдений. R₁, R₂, R₃ – отражения от ОГ1, ОГ2, ОГ3. PPP – головная преломленная волна.

1.5.3. Реальные волновые поля

Реальные сейсмические материалы получены в геофизических скважинах, расположенных на аварийном участке шахтного поля действующего калийного рудника. Скважины обсажены пластиковой колонной (ПВХ), частично водонаполненные. В результате специальных мероприятий по созданию депрессионной воронки вокруг аварийной зоны уровень грунтовых вод понижен до глубин порядка 100 м от поверхности земли, что существенно изменило физико-механические свойства осушенного массива и привело к увеличению затухания акустического сигнала за счет уменьшения природной влажности и увеличению глубины границы аэрации. Это, в свою очередь, значительно ухудшило качество регистрируемых волновых полей с применением наземных систем расстановки. Так, для ВСП при удалении от устья скважины на 50 м сигнал на глубинах до 100 м практически пропадает (рисунок 1.6). Видимая частота падающей прямой волны составляет 80-100 Гц.

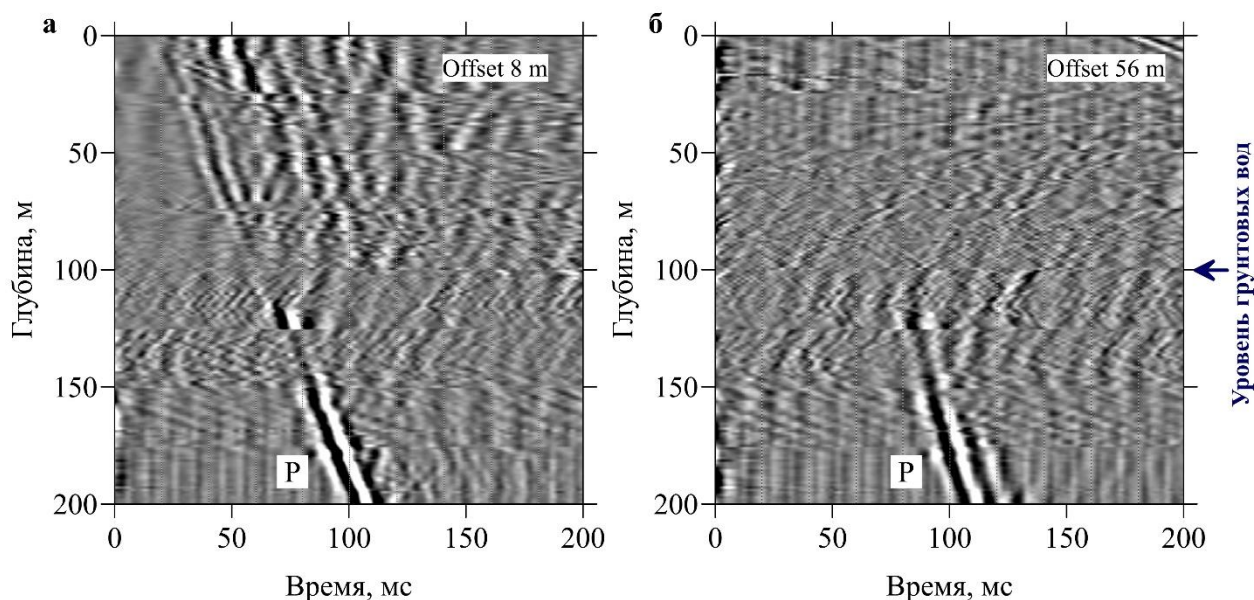


Рисунок 1.6 – Сейсмограммы вертикального сейсмопрофилирования на аварийном участке. (а) – удаление 8 м, (б) – удаление 56 м.

Для межскважинного просвечивания выполняемого ниже уровня грунтовых вод волновое поле избавлено от фильтрующего влияния верхней

азрированной зоны, и регистрируются волновые поля с высоким соотношением сигнал/шум, и частотным составом 150-600 Гц.

На рисунке 1.7 приведена схема межскважинного просвечивания и попутно выполняемого обращенного вертикального сейсмопрофилирования. Возбуждение выполняется в скважине №1 с помощью электроискрового источника с энергией 2500 Дж и 4-х кратным накоплением на одной точке. Регистрация осуществляется одновременно на поверхности с помощью Z-геофонов и в скважине №2 с помощью 24-х канальной пьезоэлектрической гидрофонной косы.

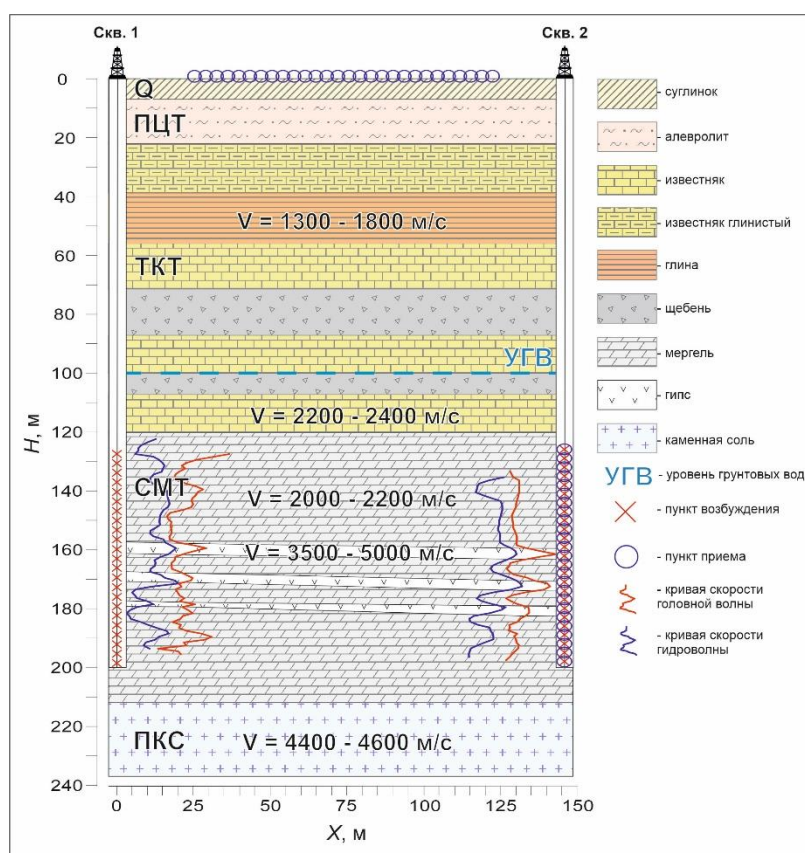


Рисунок 1.7 – Сейсмогеологическая модель среды и типичная система наблюдений. ПЦТ – Пестроцветная толща, ТКТ – Терригенно-карбонатная толща, СМТ – соляно-мергельная толща, ПКС – покровная каменная соль.

Типичная сейсмограмма межскважинных наблюдений приведена на рисунке 1.8. Основные элементы волнового поля полностью соответствуют модельным данным. Наиболее интенсивными являются прямая проходящая

волна (А) и отражения от кровли соли (С). Головная волна (В) регистрируется раньше остального волнового поля, что позволяет легко ее идентифицировать.

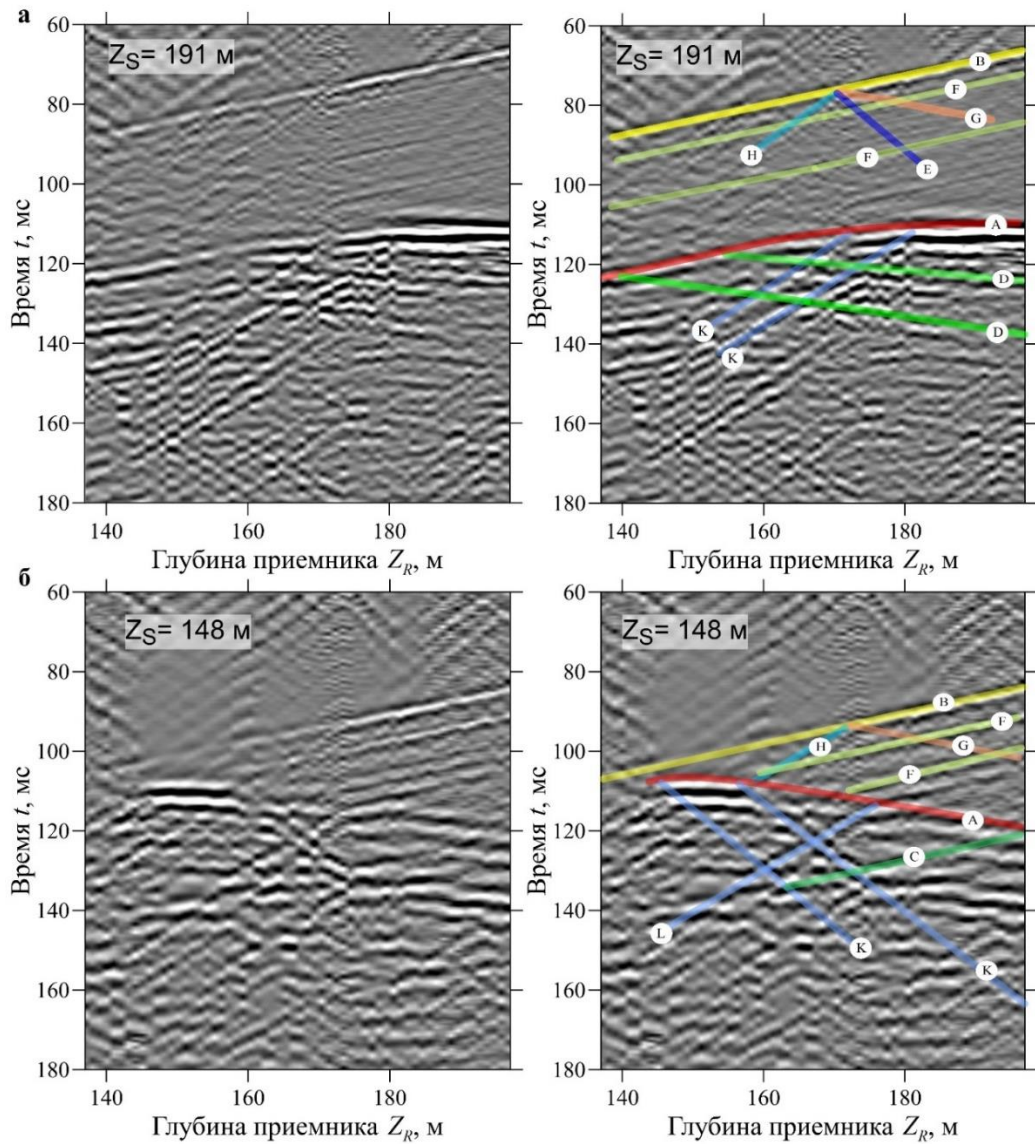


Рисунок 1.8 – Сейсмограммы межскважинного просвечивания с выделенными осями синфазности основных элементов волнового поля. (А) – прямая продольная волна Р, (В) - головная волна РРР, (С) – отражения из нижней п/п Р₁Р, (D) – отражения из верхней п/п Р₂Р, (Е) – отраженная обменная головная волна РРР₂С, (F) – отражения из солевой толщи Р₃Р, (G) – продольные отражения головной волны РРР₂Р, (H) – обменно-преломленная головная волна РРР₂С, (K) обменно-преломленная волна РС, (L) – обменно-отраженная волна Р₁С. Индекс 1 – отражения снизу вверх в надсолевой толще, 2 – отражения сверху вниз, 3 – отражения из солевой толщи. (а) – Глубина источника 191 м, (б) – глубина источника 148 м.

Прохождение этих основных элементов волнового поля через массив генерирует вторичные поля отраженных и обменных волн. Для построения сейсмических разрезов полезным сигналом будут являться отраженные волны

P_1P из нижней полуплоскости (С) и P_2P из верхней (D). Данные отражения могут быть обработаны отдельно для получения акустических изображений пространства в виде разреза отраженных волн. Также как и при полноволновом моделировании, регулярным является присутствие на волновой картине волн, по кинематическим характеристикам соответствующих поперечным волнам (волны К, Е, F, J).

Как отмечено ранее, регистрация таких волн происходит благодаря обмену поперечных волн на стенках скважины, в результате на гидрофоны приходит продольная волна. Поскольку доля времени распространения такой обменной продольной волны в общем пути составляет весьма малую часть, можно считать, что регистрируется поперечная волна. Также существует предположение, что данные волны могут являться гидроволнами, имеющими весьма близкие кинематические характеристики.

1.6. Оценка разрешающей способности преломленных и отраженных волн при проведении скважинных исследований

Как было указано в разделе 1.3, горизонтальная разрешающая способность наземных сейсмических методик на отраженных волнах определяется размерами первой зоны Френеля. Размер этой зоны определяется из условия равенства путей от источника и приемника до точки отражения. Для скважинных методов такое условие в подавляющем числе случаев не выполняется, поэтому для оценки разрешающей способности методик отраженных волн можно использовать более общий способ – оценку объема первой зоны Френеля. Такой подход нередко применяется в сейсморазведке для определения разрешающей способности сейсмических методик, а также их пространственной информативности при изучении породного массива [Ленский, 1987; Denham, 2000; Кондратьев, 2006; Завалишин, 2008; Ли, 2012; Шишкина, 2015; Владов, 2020].

Как правило, при обработке сейсмических данных используется лучевой подход распространения сигналов. Такой подход подразумевает

высокочастотную асимптотику сейсмических лучей и является основой «геометрической сейсмологии». Вне зависимости от размерности изучаемого пространства сейсмические лучи принимаются бесконечно малой толщины, и без учета координаты времени могут быть описаны как одномерный объект. Положение сейсмических лучей в геометрической сейсмологии подчиняется закону Снеллиуса и принципу Ферма о наименьшем времени распространения.

В реальных средах регистрируемые волновые поля являются результатом интерференции элементарных сейсмических волн, возникающих в соответствии с принципом Гюйгенса-Френеля в каждой точке фронта исходной волны. Данный подход опирается на законы геометрической сейсмологии, но большую роль здесь приобретают волновые процессы. Ключевым отличием волновой сейсмологии от геометрической заключается в необязательности соблюдения принципа Ферма. Волновое поле в точке регистрации рассматривается как результат интерференции всех возможных лучей. Часть лучей, длина которых отличается от длины луча Ферма не более чем на половину длины волны $\lambda/2$ создают конструктивную интерференцию, приходя в точку регистрации синфазно (рисунок 1.9). Для времен распространения лучей такое условие описывается следующим выражением [Кравцов, 1980а]:

$$|t_{sp} + t_{pr} - t_{sr}| \leq T/2, \quad (1.1)$$

где t_{sp} – время от источника до промежуточной точки P , t_{pr} – время от точки P до приемника, t_{sr} – время по лучу Ферма, T – период колебаний.

Объем, для каждой точки которого выполняется данное выражение, называется объемом первой зоны Френеля или просто объемом Френеля [Кравцов, 1980а]. Данный объем ограничен огибающей первых зон Френеля при распространении луча от источника к приемнику.

Примечательно, что фундаментальная работа [Кравцов, 1980а], позволившая перейти от геометрической сейсмологии к волновым эффектам в

сейсмоакустике, написана сразу же после опубликования учебника по геометрической оптике [Кравцов, 1980б].

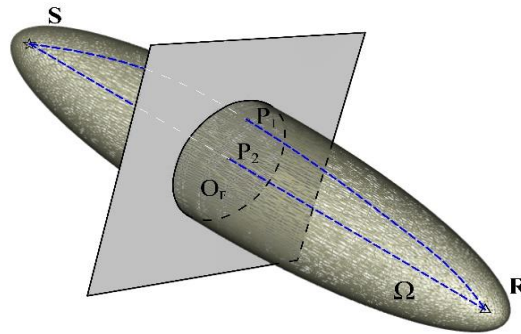


Рисунок 1.9 – Объем Френеля Ω для источника S и приемника R . Точки P_1 и P_2 принадлежат объему Френеля в случае, если удовлетворяют условию (1). O_F – Первая зона Френеля в точке пересечения с лучом SR . (Кравцов, Орлов, 1980)

Рассмотрение волновых эффектов на основании аппроксимации луча объемом Френеля позволяет учесть интегральные эффекты влияния трехмерной геологической среды на сейсмоакустический сигнал. Как следует из выражения (1.1), ключевым параметром, определяющим геометрические размеры и форму объема Френеля является частотный состав сигнала.

Упомянутая фундаментальная работа [Кравцов, 1980а], написана применительно к распространению света, но данная теория полностью применима и к сейсмоакустике, что нашло отражение в работе [Červený, 1992]. Развитие данного направления привело к созданию отдельной методики изучения геологического массива с помощью вычисления объема Френеля прямой проходящей волны [Schuster, 1993; Vasco, 1995; Spetzler, 2004; Spetzler, 2007]. Волновой подход к изучению прямых проходящих волн известен как томография Френелевского объема [Watanabe, 1999; Xu, 2006].

Методика получения скоростного разреза с помощью поверхностных волн основана на дисперсии поверхностных волн, которая может быть объяснена зависимостью в слоистой среде длины волны и объема Френеля от частоты сигнала.

Интерференционная природа преломленных головных волн и теоретическая сторона вопроса применительно к электромагнитным волнам рассмотрена в работах В.М. Бабича и А.А. Мацковского [Мацковский, 2014; Бабич, 2015; Мацковский, 2015], которые развили идеи В.С. Булдырева, работавшего над этой темой в 70-х годах прошлого века.

1.6.1. Способы расчета объема Френеля сейсмической волны

Разрешающая способность сейсмических изображений определяется длиной волны на разрезе, которая по определению зависит от доминантной частоты полезного сигнала и скорости распространения волн в разрезе.

В изотропном пространстве объем Френеля прямой волны представляет собой эллипсоид вращения с большим диаметром $d_x = l + \lambda/2$ и малыми диаметрами [Červený, 1992]:

$$d_y = d_z \approx \sqrt{\lambda l} = L \sqrt{\frac{\lambda}{L}}, \quad (1.2)$$

где L – расстояние от источника до приемника. Множитель $\sqrt{\lambda/l}$ выделен для того, чтобы показать физико-геометрический смысл выражения, который заключается в том, что поперечный размер объема Френеля зависит от соотношения длины волны к длине акустического луча.

Для отраженных волн в изотропном пространстве определение объема Френеля можно свести к случаю прямой волны путем введения мнимого источника. Плоскость отражения будет выступать в качестве зеркальной границы, в том числе и для объема Френеля. Как отмечено ранее, в наземной сейсморазведке горизонтальная разрешающая способность (размер отражающей площадки) при структурных построениях определяется радиусом первой зоной Френеля. При этом расстояние от точки отражения до источника и приемника, находящихся на поверхности равны. Геометрия систем наблюдений во внутренних точках среды (например, при межскважинных и шахтных исследованиях), как правило не предполагает равноудаленность точек отражения от источника и приемника, в этом случае

поперечный размер сечения объема Френеля для произвольной точки можно оценить по формуле [Červený, 1992]:

$$d_F \approx 2\sqrt{l_s l_r} \sqrt{\frac{\lambda}{l}}, \quad (1.3)$$

где $l_s + l_r = l$ - пути от точки отражения до источника и приемника. Из выражения видно, что, поперечное сечение объема Френеля в произвольной точке, помимо соотношения длины волны λ к длине луча l еще зависит и среднего геометрического расстояний от точки отражения до источника и приемника.

При наклонном падении волны на отражающую границу площадка отражения растягивается в эллипс, малый диаметр которого определяется формулой (1.3), а большой диаметр учитывает геометрический фактор $\cos(\beta)^{-1}$:

$$d_{FL} \approx 2\sqrt{l_s l_r} \sqrt{\frac{\lambda}{l}} \cos(\beta)^{-1}, \quad (1.4)$$

где β – угол между лучом и нормалью к плоскости отражения.

Приведенные выражения справедливы для изотропной среды, в которой скорость распространения упругих волн постоянна. Получение аналитических решений для сложных сред, содержащих скоростные неоднородности и акустические границы не представляется возможной. Альтернативной возможностью оценки объема Френеля для таких сред является решение прямой задачи.

Последовательность действий при моделировании объема Френеля пары точек приведена в работах [Červený, 1992; Bai, 2014] и включает следующие этапы:

- расчет поля времен распространения прямых, отраженных или преломленных волн для двух источников, помещенных в искомые точки до всех пунктов приема на рассматриваемой плоскости;
- расчет времени распространения волны по идеальному лучу (бесконечной частоты) для выбранной пары точек;
- получение значения левой части выражения (1.1).

В зависимости от требуемой размерности, расчет поля времен может быть выполнен как в двухмерном [Vidale, 1988; Podvin, 1991; Rawlinson, 2004; Zhang, 2005; Болгаров, 2009; Han, 2018], так и в трехмерном вариантах [Vidale, 1990; Pica, 1997; de Kool, 2006]. В работе [Liu, 2009] проведено сравнение 2D и 3D моделирования объема Френеля, и показано, что отличие будет заключаться в распределении плотности энергии, при этом границы объема первой зоны Френеля для обоих вариантов совпадают.

Для получения представления о форме объема Френеля головных и отраженных волн, наблюдаемых при межскважинном просвечивании (МСП) моделирование проведено в 2D (в нескольких плоскостях) и 3D вариантах.

Проведение трехмерного моделирования возможно при условии плоскостных моделей с помощью программного обеспечения 2D путем перехода от декартовых (x, y, z) к цилиндрическим (r, φ, z) координатам. Для горизонтальных границ в слоистой модели решение будет инвариантно относительно φ , что позволяет перейти к двумерному массиву данных (r, z) и использовать математический аппарат 2D.

Обратный переход к декартовым координатам позволяет получить поле времен $t(x, y, z)$. В остальном последовательность действий аналогична 2D моделированию.

1.6.2. Построение объема Френеля способом лучевого моделирования

На первом этапе решается прямая задача определения поля времен первых вступлений прямых и преломленных волн вблизи кровли солей для взаимных точек (рисунок 1.10). При расчетах в модели заданы типичные значения скоростей для Верхнекамского месторождения: в верхней толще (СМТ) $V_1 = 2200$ м/с, в нижней толще (ПКС) $V_2 = 4500$ м/с. Пункты приема расположены с шагом по горизонтали и вертикали 4 м. На участке между скважинами задана область со скоростями близкими к 0, для исключения из

модели прямых волн, благодаря чему в первых вступлениях однозначно регистрируется головная волна.

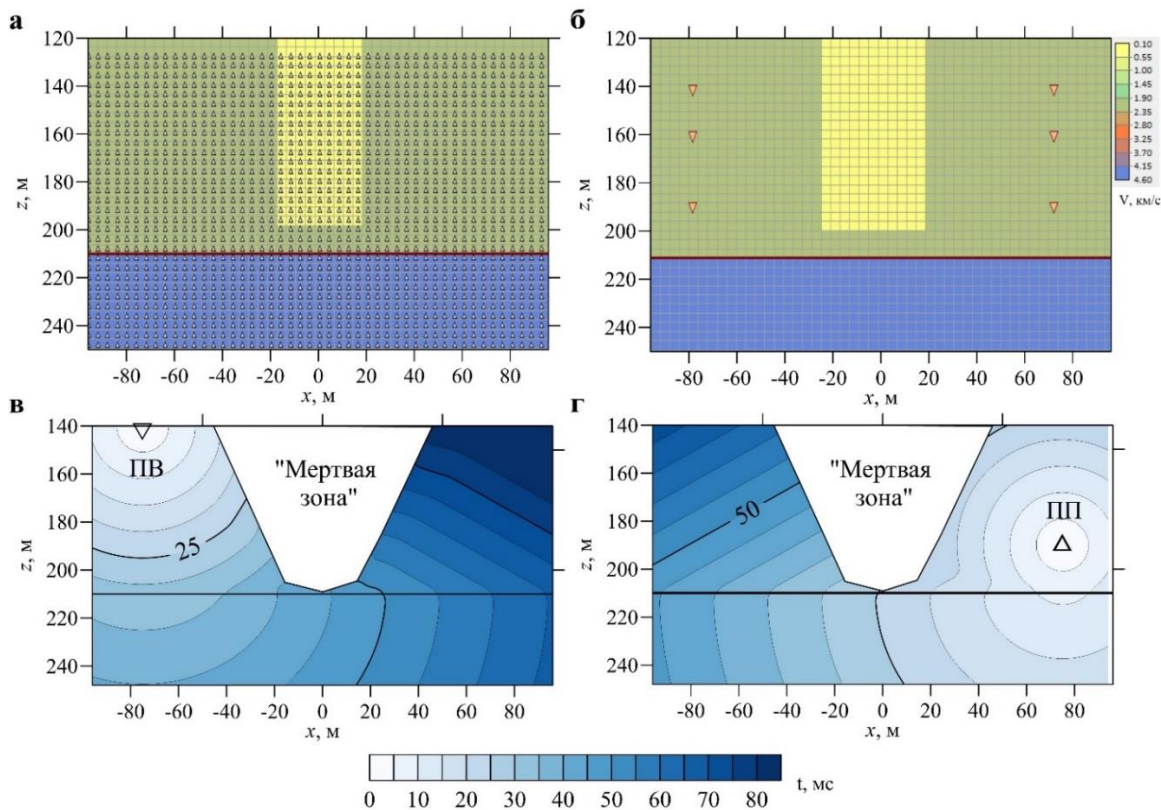


Рисунок 1.10 – Модель для расчета времен первых вступлений (а – положение приемников, б- положение источников) и поля времен головных волн в прямом (в) и обратном (г) направлении

В соответствии с левой частью выражения (1.1) находится сумма рассчитанных полей времен, из которой вычитается время луча Ферма для заданной пары источник-приемник. Результирующее поле времен представлено на рисунке 1.11.

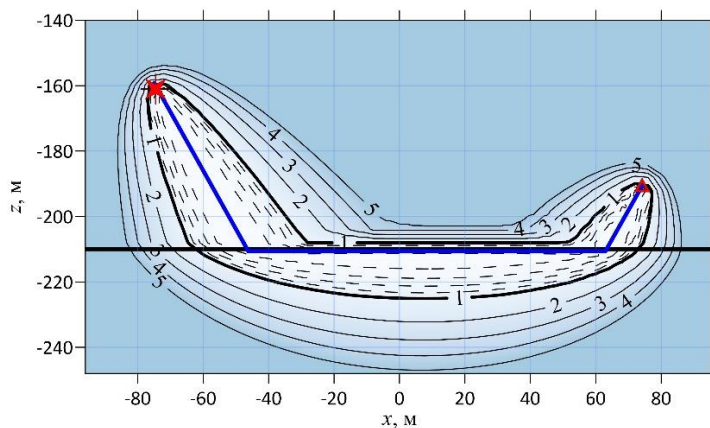


Рисунок 1.11 – Поле времен полученное по формуле (1.1) для головной волны

Данное распределение можно интерпретировать как диаграмму для оценки объема Френеля в зависимости от периода сигнала: изолинии являются границами объема Френеля при фиксированном значении полупериода $T/2$ и позволяют получить форму сейсмических лучей. Изолиния $T/2 = 1$ мс соответствует частоте сигнала 500 Гц, что является типичным значением для головных волн, регистрируемых при межскважинном просвечивании на ВКМКС.

В соответствующих разделах следующей главы оценка разрешающей способности предлагаемых нетрадиционных скважинных подходов выполнена путем расчета объема Френеля головных и отраженных волн в сейсмогеологических условиях Верхнекамского месторождения калийных солей и для типичных систем наблюдений.

Выводы по главе 1

Современные малоглубинные скважинные сейсмические исследования связаны преимущественно с инженерными исследованиями для оценки устойчивости зданий и сооружений. Такие исследования направлены на получение скоростных распределений и физических свойств в массиве и проводятся как правило с применением прямых продольных волн.

Анализ реальных и синтетических волновых полей для сейсмогеологических условий Верхнекамского месторождения солей показывает, что развитие скважинных исследований возможно за счет изучения дополнительных классов волн и выявления особенностей их регистрации и обработки применительно к выбранным системам наблюдений и условиям месторождения. Для этого сформирована стратегия разделения волновых полей с целью декомпозиции на основные составляющие: прямые, отраженные, головные и гидроволны.

Основные задачи, стоящие перед скважинной сейсморазведкой на месторождении водорастворимого полезного ископаемого: изучение упругих характеристик среды; изучение сейсмических границ; выявление аномальных

акустических свойств в массиве; выявление и локализация геологических неоднородностей, в том числе ориентированных вертикально и субвертикально; изучение пространственно-временных изменений распределения упругих свойств.

Оценку разрешающей способности скважинных исследований предлагается выполнять с помощью моделирования объема первой зоны Френеля и последующим определением размеров площадки, участвующей в отражении сейсмоакустического сигнала.

Глава 2. Методические решения при проведении скважинных сейсмических исследований

Предлагаемые способы получения информации о строении породного массива, можно разбить на 3 основных направления. К первому направлению относятся способы получения изображений межскважинного и околоскважинного массива, основанные на изучении отраженных волн при проведении просвечивания. Второе направление связано с преломленными головными волнами, регистрируемыми в скважинах, изучение которых стало возможно благодаря уникальным сейсмогеологическим условиям Верхнекамского месторождения. Третье направление включает способы получения сейсмогеологической информации при проведении скважинного сейсмического каротажа.

2.1. Получение глубинного сейсмического разреза с помощью отраженных волн при межскважинном просвечивании

Для построения глубинного разреза с помощью отраженных волн при МСП необходимо провести ряд процедур, основными из которых являются:

- 1) выделение поля отраженных волн;
- 2) построение скоростной модели среды;
- 3) миграция точек отражения;
- 4) суммирование глубинных разрезов восходящих и нисходящих отражений.

2.1.1. Анализ и цифровая обработка волнового поля межскважинного просвечивания

Волновое поле межскважинного просвечивания при слоистом залегании пород содержит регулярные отраженные волны. Основной задачей при цифровой обработке данных межскважинного просвечивания является выделение поля отраженных волн. В системе наблюдений МСП формируется два поля отражений: восходящие и нисходящие волны. Эти два поля

необходимо обрабатывать отдельно. Успешное выполнение цифровой обработки определяют параметры системы наблюдений. Предпочтительно применение системы наблюдений, при которой шаги пунктов возбуждения ($\Delta Z_{ПВ}$) и приема ($\Delta Z_{ПП}$) равны. Такой подход делает равноправными сортировки общего пункта возбуждения (ОПВ) и общего пункта приема (ОПП) (рисунке 2.1). Принцип взаимности позволяет осуществлять симметричную обработку в этих сортировках. Кроме того, при $\Delta Z_{ПВ} = \Delta Z_{ПП}$ сортировки линии равного удаления (ЛРУ), $Z_{ЛРУ} = Z_{ПП} - Z_{ПВ}$ и общей средней линии наблюдения (СЛН), где $Z_{СЛН} = (Z_{ПВ} + Z_{ПП})/2$, имеют минимальный шаг между соседними выборками, что важно, поскольку цифровая обработка для выделения отраженных волн выполняется последовательно во всех четырех сортировках [Li, 1994].

Весь набор трасс МСП можно представить в виде трехмерного массива $A(Z_{ПВ}, Z_{ПП}, t)$, как показано на рисунке 2.2. В сортировке общей средней линии горизонтальным границам соответствуют горизонтальные годографы отраженных и преломленных волн, то есть каждая сейсмограмма является однократным временным разрезом.

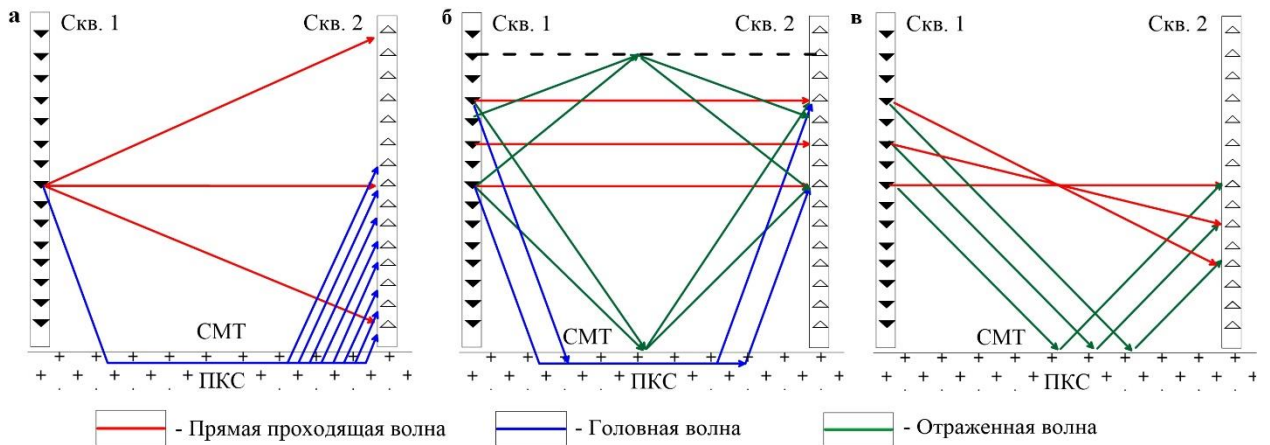


Рисунок 2.1 – Лучевые выборки в различных сортировках: а – общий пункт возбуждения, б – линия равных удалений, в - общая средняя линия

Для изучения основных элементов волнового поля, регистрируемого при проведении МСП в условиях соляного месторождения, проведено моделирование в нескольких вариантах: полноволновое для продольных волн,

а также лучевое моделирование в модели близкой к реальной для последующего совмещения с реальным волновым полем. Модель среды приближена к сейсмогеологическим условиям, описанным в разделе 1.3, и представляет собой горизонтально-слоистый разрез с высокоскоростным подстилающим слоем (модель №2). Система наблюдений – межскважинное просвечивание, забой скважин находится выше кровли высокоскоростного пласта.

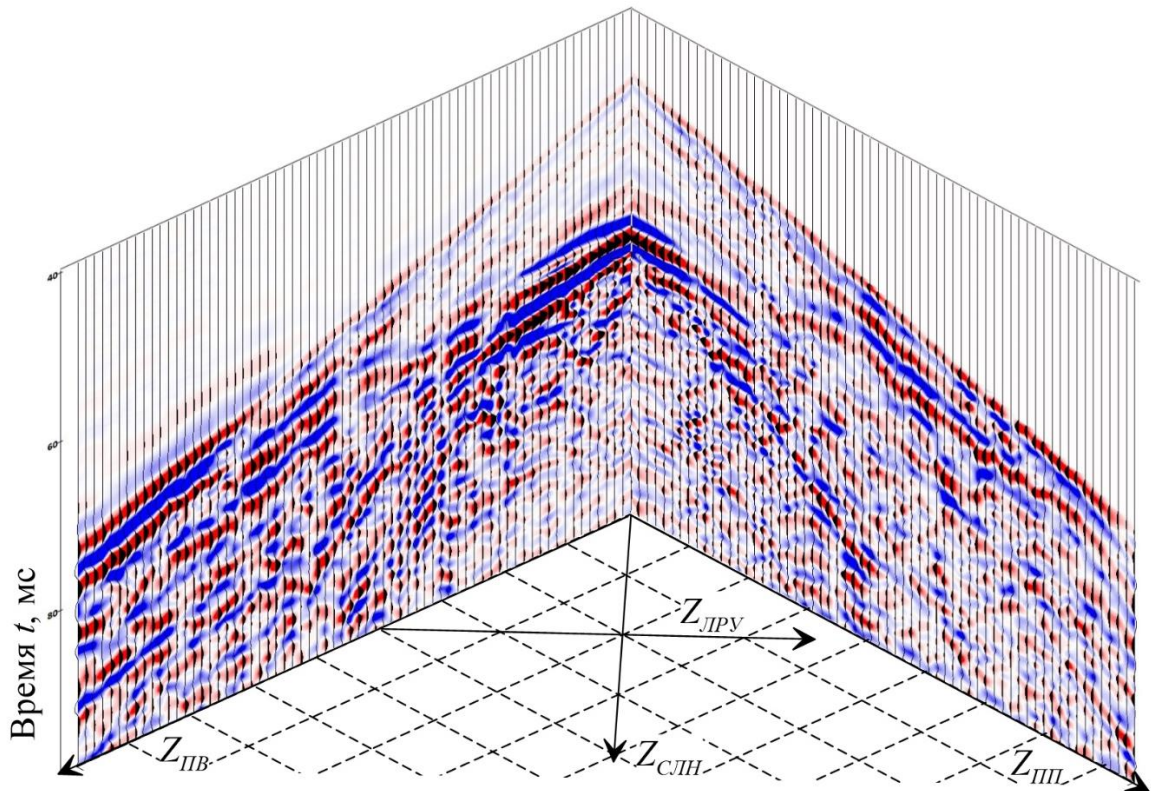


Рисунок 2.2 – Трехмерное представление трасс МСП

Полноволновое моделирование для продольных волн (рисунки 2.3-2.5) позволяет продемонстрировать положение годографов прямых, отраженных, преломленных головных и кратно-отраженных волн. В различных сортировках конфигурация годографов существенно отличается, что позволяет применять данный факт при обработке для выделения целевых волн. Так, к примеру, однократно отраженные волны в сортировке ОПВ имеют наклонный годограф, а в сортировке средней линии наблюдений – прямой. Двукратно отраженная волна в сортировке ОПВ имеет сходную кинематику с

прямой волной, но формирует горизонтальный годограф в сортировке ЛРУ, в то время как по линии СЛН ее кажущаяся скорость минимальна.

Схематичные изображения годографов разных классов волн в разных сортировках сведены в таблицу 2.1. Данная схема позволяет довольно легко составить стратегию декомпозиции волнового поля на отдельные классы волн для последующей отдельной обработки. Первые вступления лучше всего могут быть подавлены в сортировке по линии равных удалений с помощью когерентного или медианного фильтра. Отраженные и преломленные волны имеют плоский годограф в сортировке общей средней линии, что позволяет либо выделить, либо подавить их, в зависимости от того, какие волны принимаются в качестве полезных. Разделение восходящих и нисходящих отражений возможно в сортировках ОПВ и ОПП.

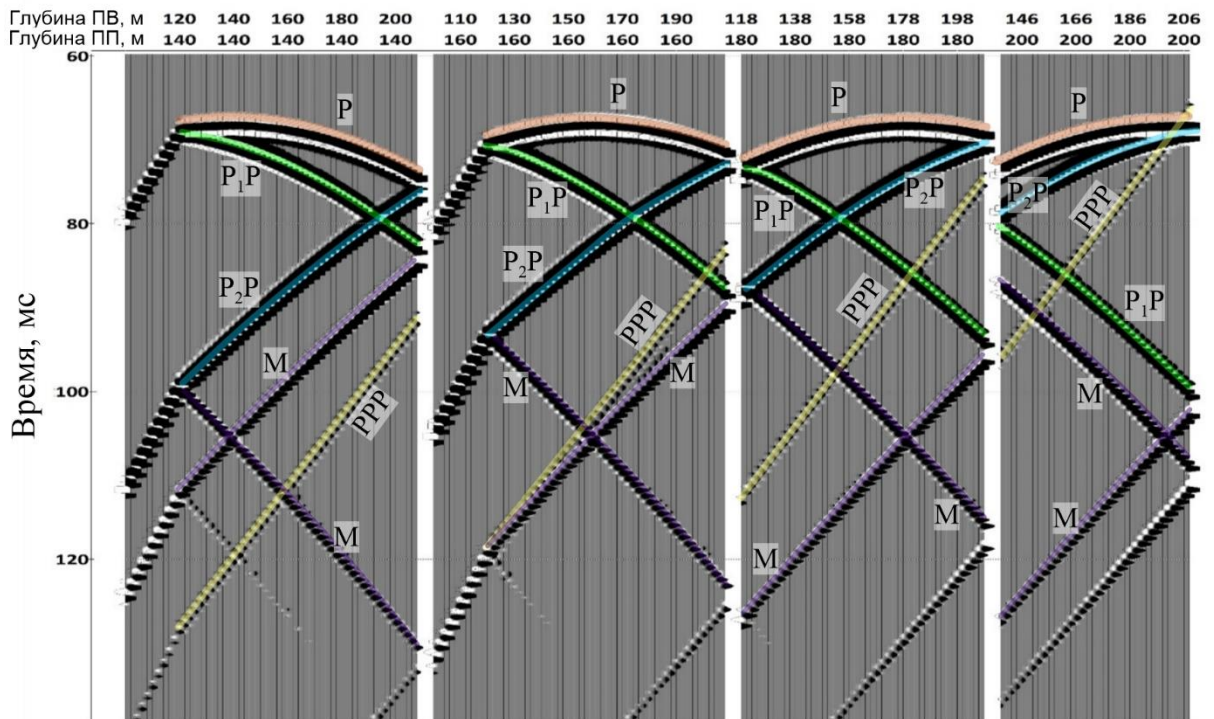


Рисунок 2.3 – Синтетические сейсмограммы продольной волны, сортировка ОПВ. P – прямая волна, P₁P – отражение сверху, P₂P – отражение снизу, PPP – головная волна, M – кратная волна.

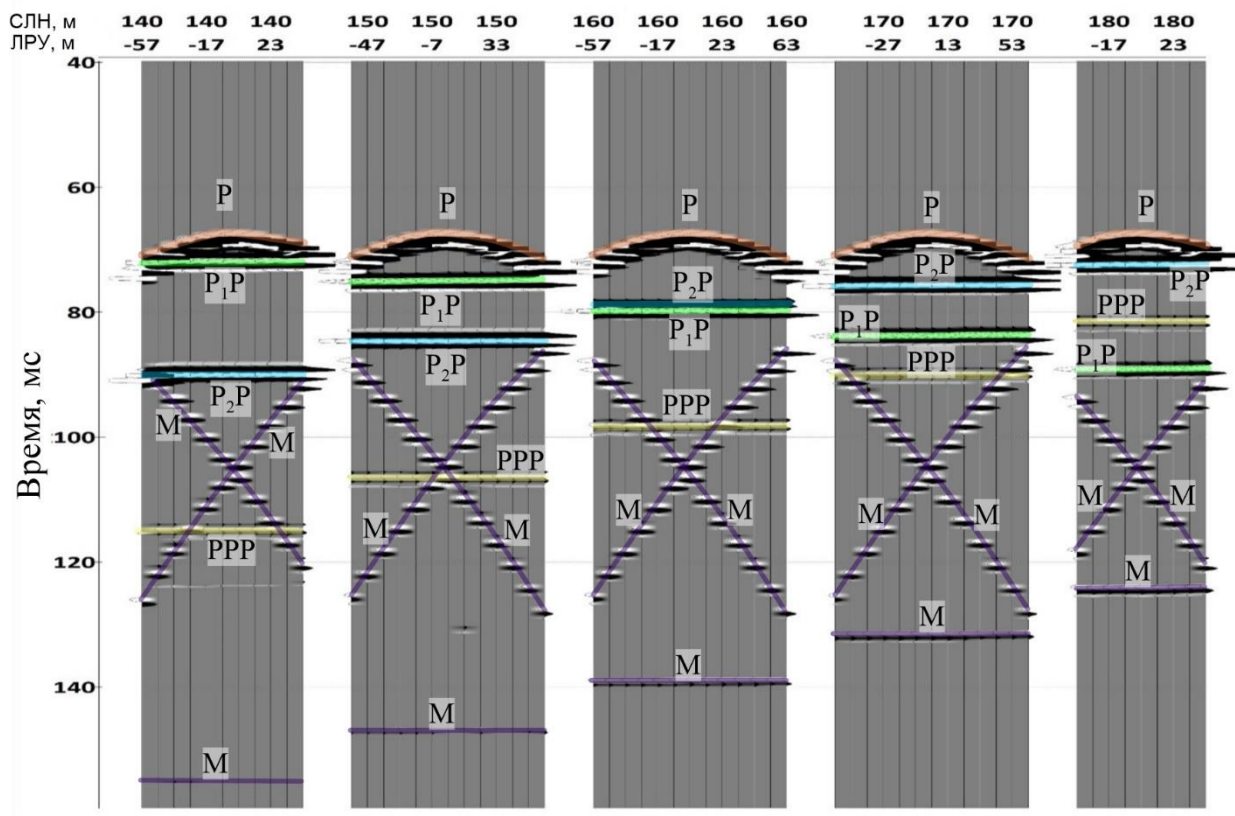


Рисунок 2.4 – Синтетические сейсмограммы продольной волны, сортировка СЛН. Обозначения соответствуют рисунку 2.3.

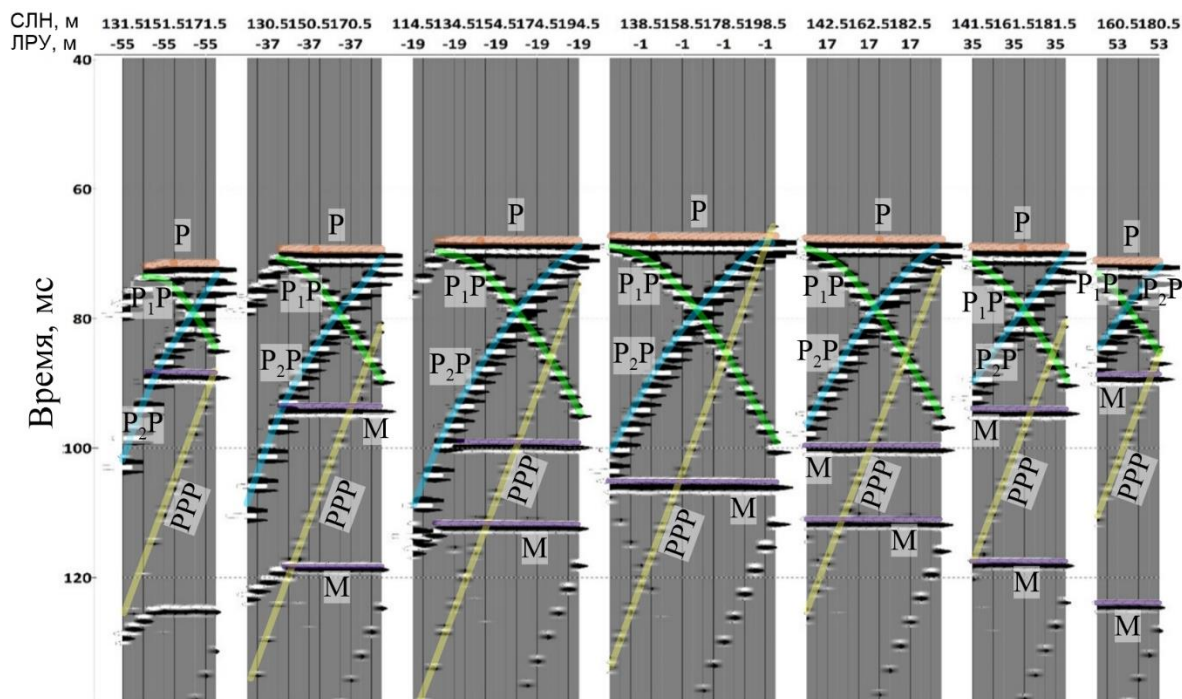






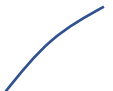




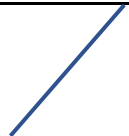





Рисунок 2.5 – Синтетические сейсмограммы продольной волны, сортировка ЛРУ. Обозначения соответствуют рисунку 2.3.

Таблица 2.1 – Конфигурация годографов различных классов волн в различных сортировках

	ОПВ	СЛН	ЛРУ
Прямая волна			
Отраженная сверху			
Отраженная снизу			
Преломленная головная			
Кратная отраженная			

На реальных сейсмограммах (рисунок 2.6) помимо продольных волн присутствуют интенсивные обменные волны, которые формируются на горизонтальных акустических границах. При этом они присутствуют как в направлении ОПВ, так и в ОПП, соответственно, их подавление необходимо выполнять в обеих сортировках. Подавление обменных волн чаще всего не вызывает сложностей, поскольку их кажущаяся скорость существенно ниже, чем скорости остальных классов волн.

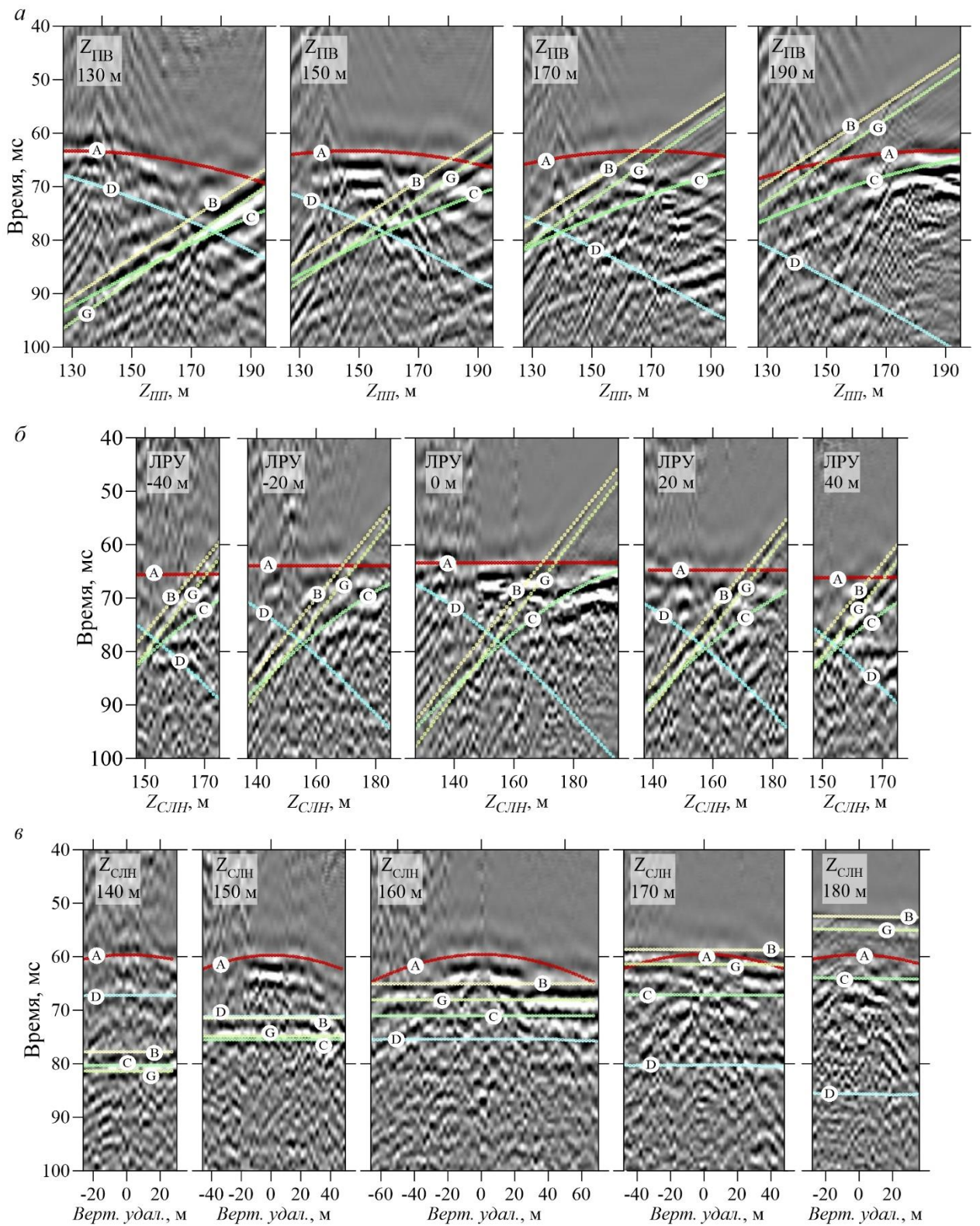


Рисунок 2.6 – Совмещение реальных данных и результатов моделирования времени регистрации прямых и отраженных волн в сортировках ОПВ (а), ЛРУ (б) и СЛН (в). (А) – прямая продольная волна Р, (В) - головная волна РРР, (С) – восходящие отражения из Р₂Р, (D) – нисходящие отражения Р₁Р, (G) – отражения от слоев в толще солей.

На рисунке 2.7 приведены сейсмограммы с выделенным полем восходящих и нисходящих отраженных волн. Отметки времени первых вступлений прямой волны позволяют наблюдать точки формирования отражений.

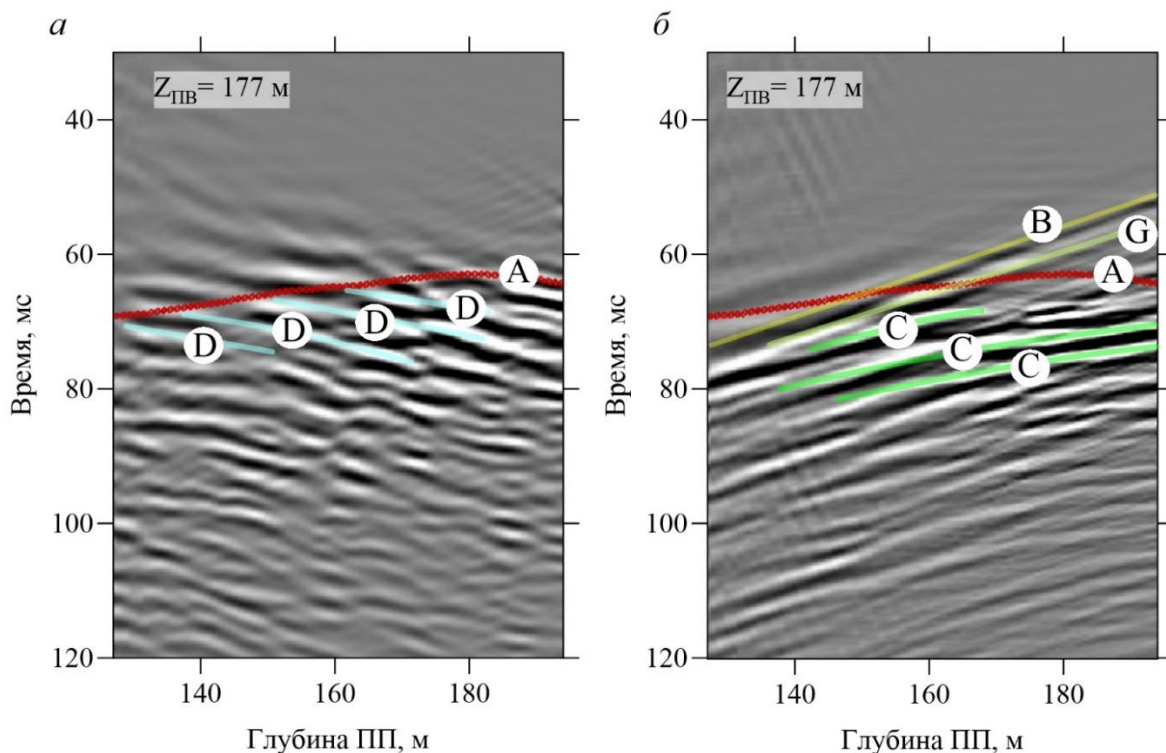


Рисунок 2.7 – Итоговые сейсмограммы ОПВ с выделенным полем нисходящих (а) и восходящих (б) отраженных волн

2.1.2. Построение скоростной модели среды

Наиболее изученным и широко применяемым способом определения скоростей распространения упругих волн при проведении скважинных исследований является сейсмическая томография на прямых волнах. Основная идея томографии - в получении волнового поля по системе многократных перекрытий, определении времени прохождения прямых волн и решении системы линейных уравнений для получения скоростного распределения в межскважинном пространстве. Несмотря на высокий уровень развития методики межскважинной томографии имеются ограничения, связанные с физическим пределом ее разрешающей способности.

Скоростная модель среды рассчитывается на основании многолучевой томографии, а также дополнительной априорной информации о выше- и нижележащих пластах. Технология получения скоростного разреза с помощью сейсмотомографии детально описана во многих работах [Nolet, 2008; Болгаров, 2009; Rao, 2016; Кулаков, 2022].

Обратная кинематическая задача томографии решается путем подбора модели среды по критерию минимальности невязок между наблюдаемыми и расчетными временами пробега волн, путем лучевого моделирования [Болгаров, 2009]. Для преодоления некорректности обратной задачи томографии, алгоритмы, как правило, используют способ регуляризации, который позволяет получить физически и геологически адекватное решение.

Согласно [Shuster, 1996; Nolet, 2008; Шишкина, 2015] для МСП минимальные размеры скоростной аномалии по горизонтали (D_x) и по вертикали (D_z), которая может быть выделена с помощью двухсторонней расстановки, ограничен объемом Френеля отдельных лучей, зависящего от длины волны λ , а также геометрией системы расстановки: вертикальной длиной линий возбуждения и приема h , и расстоянием между скважинами L_x , которые вместе определяют угловое покрытие (рисунок 2.8):

$$D_z \geq \sqrt{\frac{1}{2} L_x \lambda}, \quad (2.1)$$

$$D_x \geq \frac{L}{h} \sqrt{\frac{3}{2} L_x \lambda}. \quad (2.2)$$

При расстояниях между скважинами 150-250 м и частотах первых вступлений до 300 Гц вертикальная разрешающая способность составляет 15-25 м. В соответствии с выражениями (2.1 и 2.2) горизонтальная разрешающая способность при двухсторонней расстановке и $h = L$, в $\sqrt{3}$ хуже, чем вертикальная. Повысить горизонтальную разрешающую способность можно за счет расширения углового покрытия путем совмещения системы наблюдений МСП с непродольным ВСП и перехода к трехсторонней

расстановке (рисунок 2.9). В результате горизонтальная разрешающая способность повышается до значений сравнимых с вертикальной разрешающей способностью.

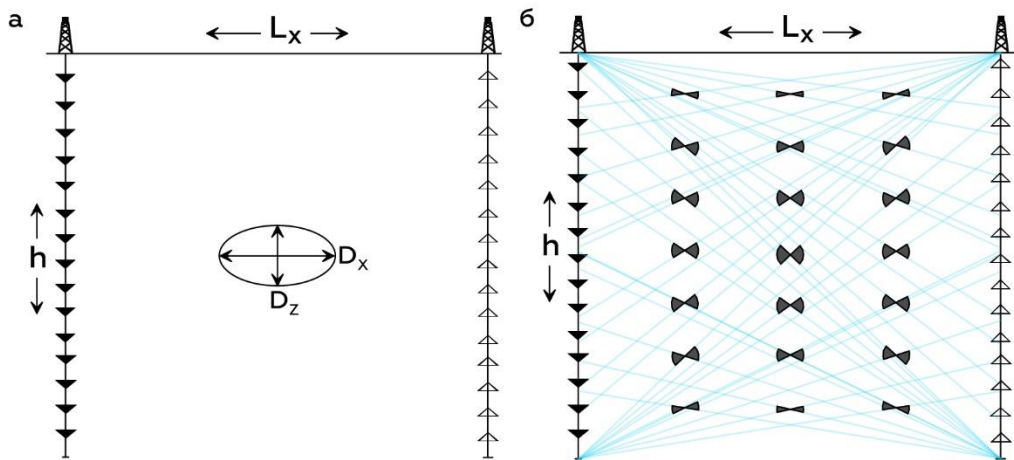


Рисунок 2.8 – К описанию вертикальной и горизонтальной разрешающей способности выделения скоростных аномалий при двухстороннем межскважинном просвечивании. а – минимальные размеры выделяемой скоростной неоднородности, б – распределение углового покрытия

Комбинирование систем наблюдений межскважинного просвечивания и ВСП (скважина 1 – поверхность – скважина 2) обеспечивает полное лучевое покрытие в межскважинном пространстве. Пример лучевого покрытия для трехсторонней расстановки показан на рисунке 2.9а. Результатом расчета томографии является скоростное распределение между скважинами от поверхности до забоя скважин (рисунок 2.9б).

В приведенном примере расстояние между скважинами составляет 150 м, в то время как длина линий приема и возбуждения не превышает 80 м. Это существенно ограничивает угловое покрытие, соответственно привлечение данных ВСП является неизменным условием. Но даже с учетом этих данных имеется ряд областей в плоскости просвечивания, не имеющих лучевого покрытия. Данные о скоростях в этих областях получены путем интерполяции. В целом полученная скоростная характеристика отвечает представлениям о слоистом характере залегания пород в массиве, однако наблюдается существенное изменение упругих свойств вдоль пласта.

Полученная скоростная характеристика является априорной информацией для выполнения миграции отраженных волн.

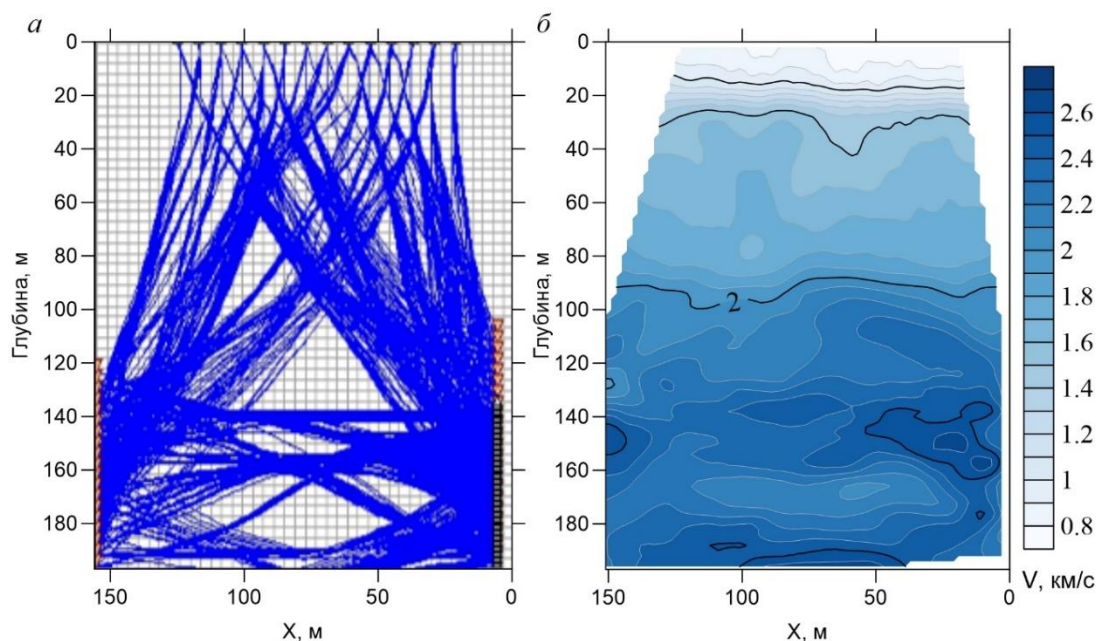


Рисунок 2.9 – Трехсторонняя томография по межскважинному просвечиванию и ВСП в двух скважинах

2.1.3. Миграция поля отраженных волн

Выбор способа миграции является во многом определяющим для получения корректного глубинного разреза. На текущем этапе реализована лучевая миграция как наиболее подходящая для слоистого разреза, кроме того, возможен вариант применения миграции Кирхгоффа до суммирования.

Так же как при трансформации ВСП-ОГТ, миграция отраженных волн при межскважинном просвечивании «искривляет» трассу отраженной волны в пространственных координатах (рисунок 2.10). Для привязки положения трассы в пространстве необходимо вычислить координаты точки отражения для каждого времени трассы.

В простейшем случае постоянной скорости в среде координата X точки отражения относительно излучающей скважины на глубине H от поверхности может быть найдена как

$$X = \frac{L_x(H - Z_{ПВ})}{(H - Z_{ПВ}) + (H - Z_{ПП})}, \quad (2.3)$$

где Z_S и Z_R – соответственно глубины источника и приемника.

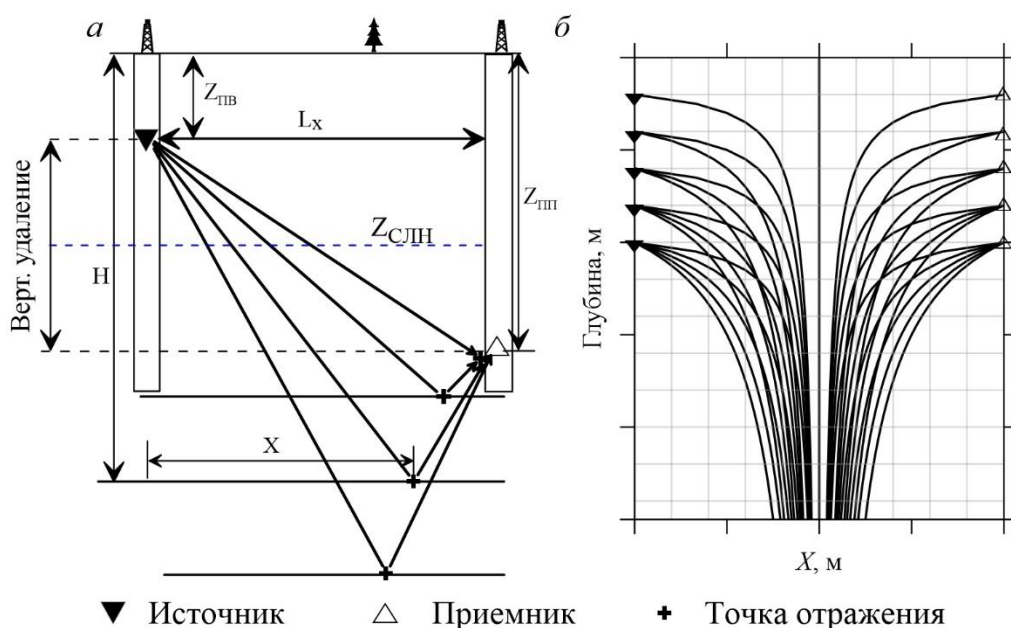


Рисунок 2.10 – Положение точек отражения в горизонтально-слоистом разрезе:
 а – фиксированная пара источник-приемник; б – траектории трасс отраженных волн в плоскости межскважинного просвечивания

Следующий этап – определение времени t распространения волны на основании известной геометрии распространения луча «источник – точка отражения – приемник» и при допущении постоянства скорости V :

$$t = \frac{\sqrt{X^2 + (H - Z_{ПВ})^2}}{V} + \frac{\sqrt{(L_x - X)^2 + (H - Z_{ПП})^2}}{V}. \quad (2.4)$$

Таким образом, определяется связь времени t на сейсмической трассе и координат (X, H) на глубинном разрезе. Трансформация всего набора трасс с выделенными отраженными волнами позволяет сформировать глубинный сейсмический разрез. При попадании отдельных значений на разных трассах в одну точку дискретной пространственной плоскости значения усредняются.

При достаточно больших расстояниях между скважинами резкие различия скоростей приводят к возникновению эффекта нарушения монотонности функции времени отражения от глубины $t(H)$. Когда средняя линия наблюдения ($Z_{свД} = (Z_{ПВ} + Z_{ПП})/2$) находится достаточно близко к кровле соли, самым ранним сейсмическим событием является головная волна (В), следом за ней регистрируются отражения от границ в соляной толще (G),

после чего приходят прямая волна (А) и отражения в терригенной толще (С, D) (см. рисунки 1.8, 2.6).

На рисунке 2.11 приведена схема сейсмических лучей и кривые зависимости времени прихода отражения от глубины для типичного участка разреза, содержащего кровлю соли. Параметр кривых – расстояние от средней линии наблюдения до кровли соли (H_1). На глубине кровли соли кривая $t(H)$ имеет точку разрыва первого рода.

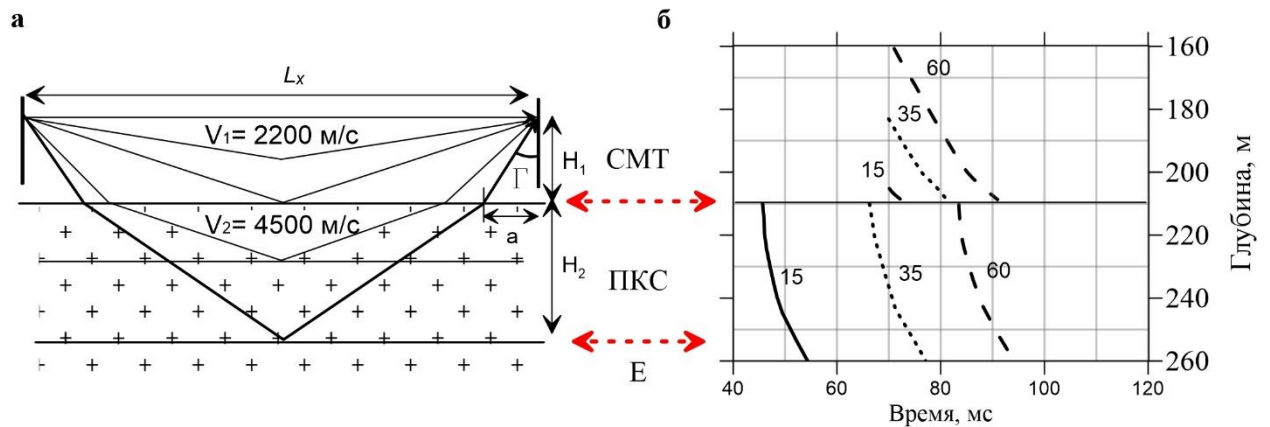


Рисунок 2.11 – Схема лучей отраженных волн вблизи резкого скачка скорости (а) и кривые зависимостей времени отражения от глубины отражения (б) (параметр кривых – H_1); кровля соли на глубине 210 м

Под кровлю солей уходят лучи с углом падения меньше первого критического i_1 для преломленных волн PPP и второго критического i_2 для преломленных SPP волн. В абсолютном выражении энергия, уходящая ниже кровли соли невелика, и уменьшается с глубиной отражения, однако за счет того, что скорости в солях примерно в 2 раза выше, чем в терригенной толще, этот сигнал не интерферирует с другими сейсмическими волнами, является регулярным, и, соответственно, пригоден для изучения соляной толщи.

Отражения от границ в толще солей, амплитуда которых намного меньше, чем прямой волны и отражений в терригенной толще. Поэтому необходимо определить максимальную глубину в высокоскоростной толще, до которой отражения будут свободны от интерференции с прямой волной. Эту глубину (H_2) можно определить из равенства времени распространения прямой волны и отражения от границы в солях:

$$\frac{L}{V_1} = \frac{2H_1}{V_1 \cos \Gamma} + \frac{\sqrt{(L_x - 2a)^2 + 4H_2^2}}{V_2}. \quad (2.5)$$

При соотношении скоростей $V_2/V_1 \approx 2$, и угле $\Gamma \leq 10^\circ$, можно упростить расчеты и принять $\cos \Gamma \approx 1$, $a = H_1 \operatorname{tg}(\Gamma) \approx H_1 / 10$. Решая уравнение (2.5) относительно H_2 получим:

$$H_2 = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{V_2}{V_1}(L_x - 2H_1)\right)^2 - L^2 + \frac{2}{5}LH_1}. \quad (2.6)$$

Полученное выражение позволяет в первом приближении оценить максимальную глубину отражений в высокоскоростной толще, исходя из скоростной модели, горизонтального расстояния между скважинами L_x и глубины средней линии наблюдений Z_{CMD} . Графически данная зависимость применительно к условиям Верхнекамского месторождения представлена на рисунке 2.12. Параметр кривых – расстояние между скважинами.

Из рисунка видно, что при расстояниях между скважинами 100 – 250 м, возможно получение глубинного разреза до глубин на 50-200 м ниже кровли ПКС.

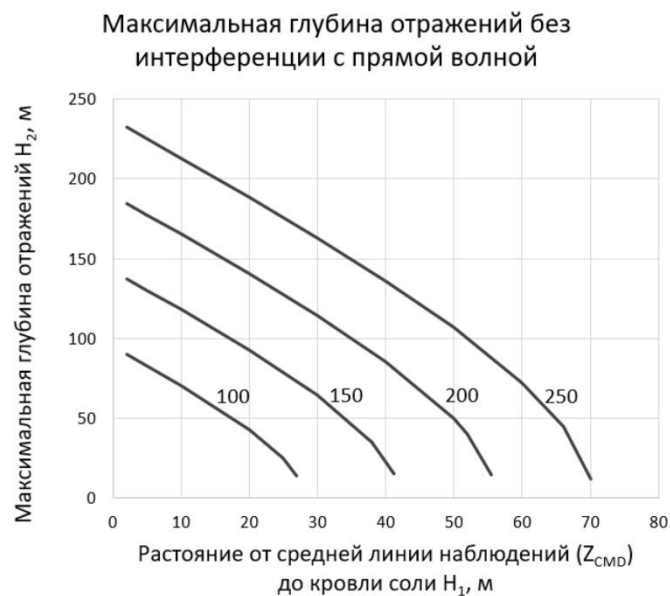


Рисунок 2.12 – Максимальная глубина отражений без интерференции с прямой волной, параметр кривых – расстояние между скважинами L_x .

Алгоритм трансформации трасс отраженных волн учитывает эффект нарушения монотонности времени отражения с глубиной и возможного наложения отражений из низкоскоростной терригенной и высокоскоростной соляной толщи.

Координаты точки отражения луча определяются на основании решения прямой задачи с учетом эффектов преломления на всем пути следования и отражения на заданной глубине, а время прохождения складывается из множества интервалов C_j , на которые разбивается путь:

$$t = \sum_j \frac{C_j}{V(X_j, H_j)}. \quad (2.7)$$

Таким образом, на основании координат источника и приемника, выбранной глубины H и скоростной модели определяются координаты X точки отражения и время на сейсмической трассе, соответствующей точке пространства (X, H) . Поскольку решение прямой задачи в таком варианте для каждой тройки (источник, приемник, глубина) в условиях мелкоячеистой сетки весьма трудоемкий процесс с точки зрения машинного времени, то возможно повышение производительности путем вычисления отдельных ключевых точек отражения и времени с некоторым шагом по глубине и последующей интерполяцией отрезков сейсмической трассы на плоскость глубинного разреза.

Поскольку энергия сигнала отраженных волн от границ внутри соляной толщи относительно мала, миграция для глубин ниже кровли солей выполняется только на участке волнового поля, зарегистрированного раньше времени первых вступлений прямой волны.

2.1.4. Получение глубинного сейсмического разреза

На рисунке 2.13 приведены результаты трансформации отдельных сейсмограмм общей средней линии, полученные способом лучевой миграции. На трансформированных сейсмограммах заполнены только участки, освещенные отраженными волнами, остальная часть не определена и имеет нулевую амплитуду.

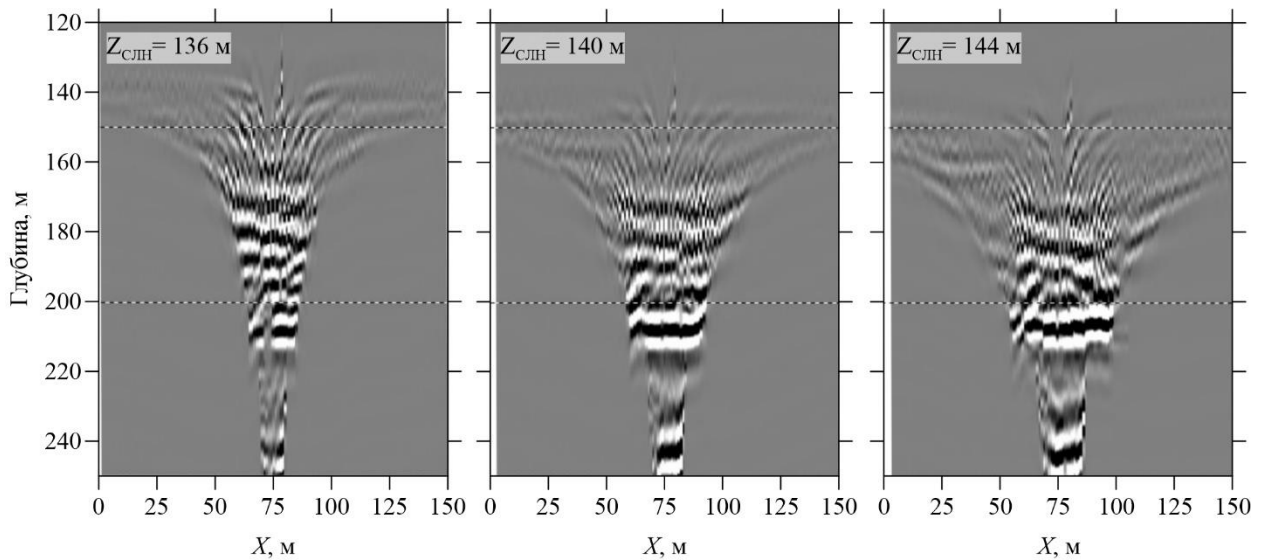


Рисунок 2.13 – Мигрированные сейсмограммы общей средней линии наблюдений

Участки сейсмограмм вблизи средней линии наблюдений, характеризующиеся большими углами отражений, отличаются неустойчивыми значениями амплитуд, из-за того, что горизонтальная отражающая площадка значительно увеличивается за счет наклонного падения сейсмического луча (рисунок 2.14). Горизонтальные размеры этой площадки можно оценить по формуле

$$d_x = \sqrt{l\lambda} / \cos \beta \quad (2.8)$$

(l – путь луча, λ – длина волны, β – угол падения).

Физически эта площадка является пересечением объема Френеля и отражающей границы [Spetzler, 2004; Шишкина, 2015; Владов, 2020]. Лучи со слишком большими углами падения (более 60° - 70°) не участвуют в формировании конечного разреза. Это, однако, как будет показано дальше может приводить к образованию зон тени.

Каждая мигрированная сейсмограмма $Z_{СМД}$ уже является однократным глубинным сейсмическим разрезом, с введенной поправкой за глубину средней линии наблюдений, что позволяет выполнять суммирование без применения дополнительных процедур.

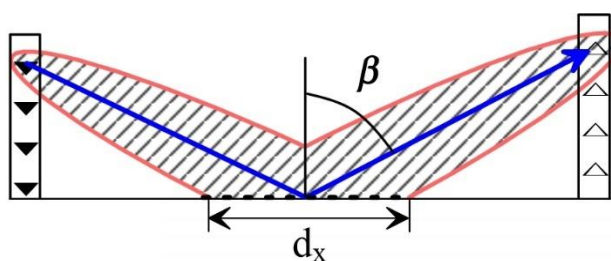


Рисунок 2.14 – Оценка ширины d_x отражающей площадки

В процессе обработки восходящие и нисходящие отраженные волны обрабатываются отдельно и для получения итогового разреза два получаемых в результате изображения необходимо совместить. Акустическая контрастность одной и той же границы при освещении сейсмическими лучами сверху и снизу будет одинакова по модулю, но противоположна по знаку, следовательно разрез, полученный при обработке нисходящих отраженных волн перед сложением необходимо инвертировать.

Обобщенная схема получения глубинного сейсмического разреза с помощью отраженных волн при межскважинном просвечивании представлена на рисунке 2.15. Основными этапами являются:

- a. цифровая обработка для выделения поля восходящих и нисходящих отраженных волн,
- b. нахождение скоростной модели среды,
- c. глубинная миграция по сейсмограммам,
- d. суммирование и построение глубинного сейсмического разреза.

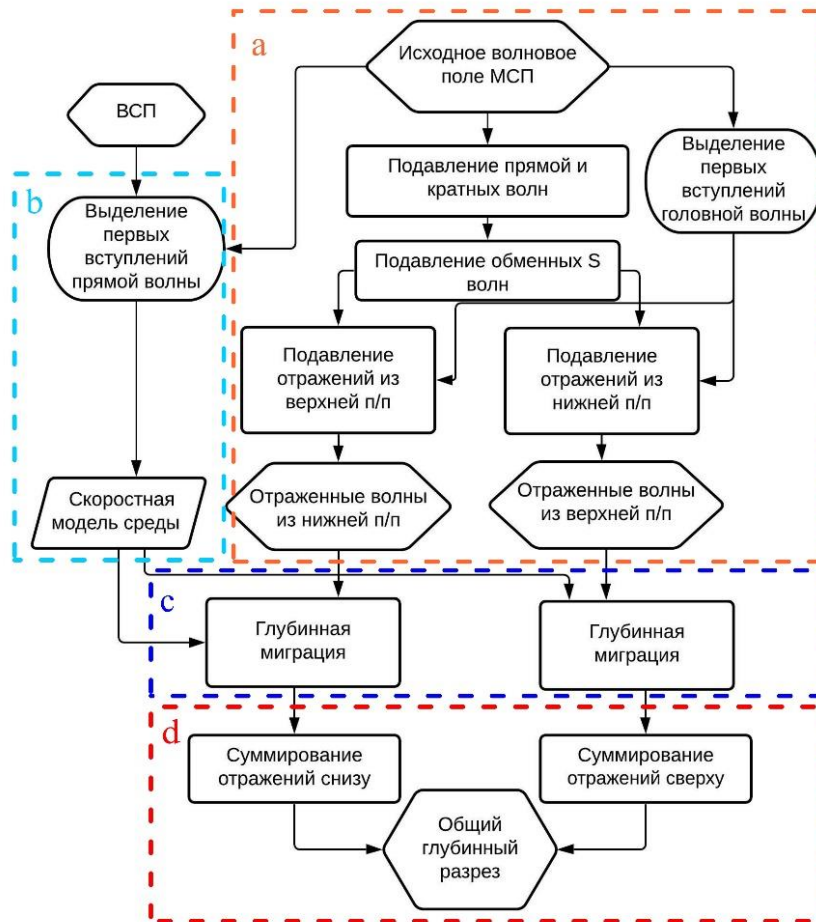


Рисунок 2.15 – Общая схема получения глубинного сейсмического разреза с помощью отраженных волн при межскважинном просвечивании.

2.1.5. Построение глубинного разреза по синтетическим данным

Для верификации разработанного способа получения глубинного разреза предложенный алгоритм применен к данным полноволнового моделирования описанным в разделе 1.4.2, модель №1.

Первый шаг включает получение скоростного разреза путем томографической инверсии на основании первых вступлений (рисунок 2.16). Конфигурация границ в целом совпадает, но заметны краевые эффекты, вследствие чего расхождение положений границ достигает 10 м.

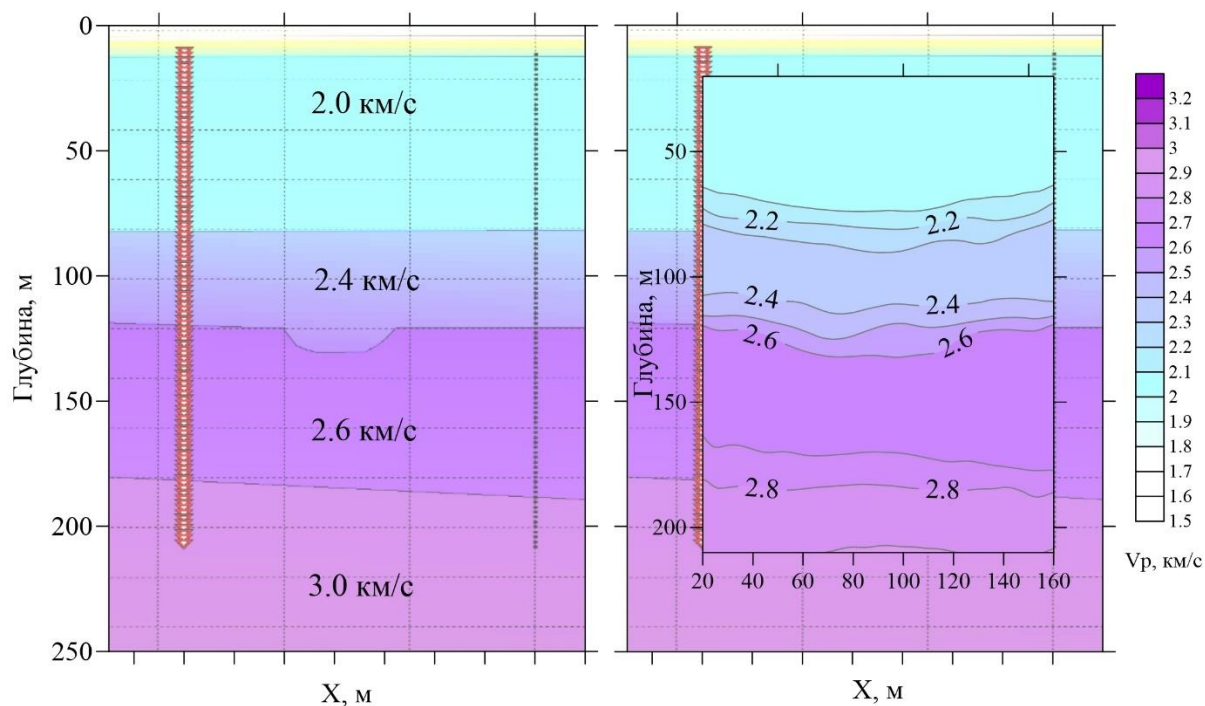


Рисунок 2.16 – Входная скоростная модель и результат томографической инверсии

С помощью пространственно-временной фильтрации в разных сортировках выделено поле отраженных волн (рисунок 2.17), которое преобразовано с помощью алгоритма лучевой миграции (рисунок 2.18).

В итоге получен суммарный временной разрез (рисунок 2.19а), к которому применена миграция Столта (рисунок 2.19б), в результате чего исправляется петля на годографе, возникающая на руслообразном искривлении отражающей границы. Сравнение полученных результатов с входной моделью показывает удовлетворительные результаты (рисунок 2.20). В частности, достаточно ярко проявляется палеоврез на второй границе, плоские границы отбиваются весьма уверенно. Глубина определения нижней границы имеет тенденцию к завышению, что по всей видимости связано с тем, что в данном примере при обработке не была учтена преломленная головная волна, приходящая чуть раньше отраженной. Большая разница скоростей обуславливает большую ошибку определения глубины нижней границы.

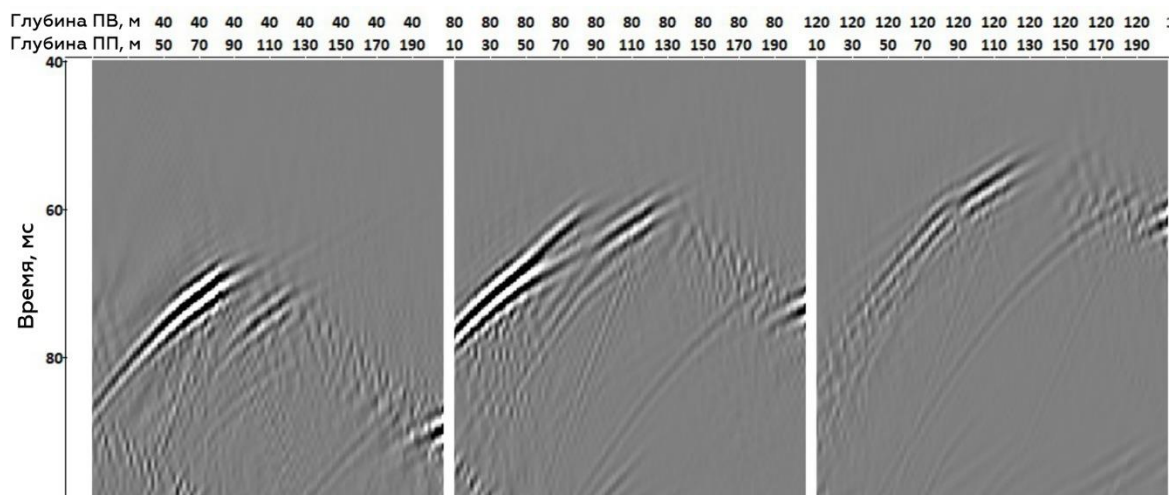


Рисунок 2.17 – Выделенное поле отраженных волн

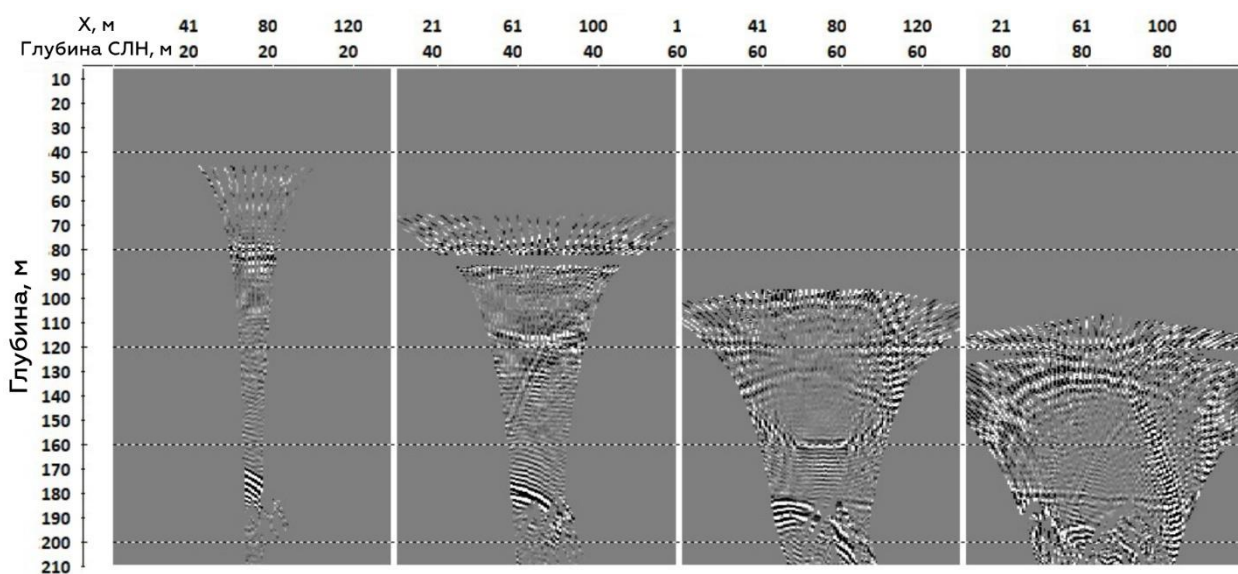


Рисунок 2.18 – Результат миграции отраженных волн по сейсмограммам до суммирования

К ограничениям технологии получения разреза с помощью отраженных волн необходимо отнести следующее:

- зоны тени при увеличении расстояния между скважинами; соотношение расстояния между скважинами и длиной расстановки приема/возбуждения критически влияет на освещенность разреза отраженными волнами;
- изучение структурного поведения горизонтов ниже кровли соляной толщи ограничено в связи с концентрацией точек отражения вблизи середины расстояния между скважинами, по глубине ограничение связано с интерференцией во временной области с прямой волной.

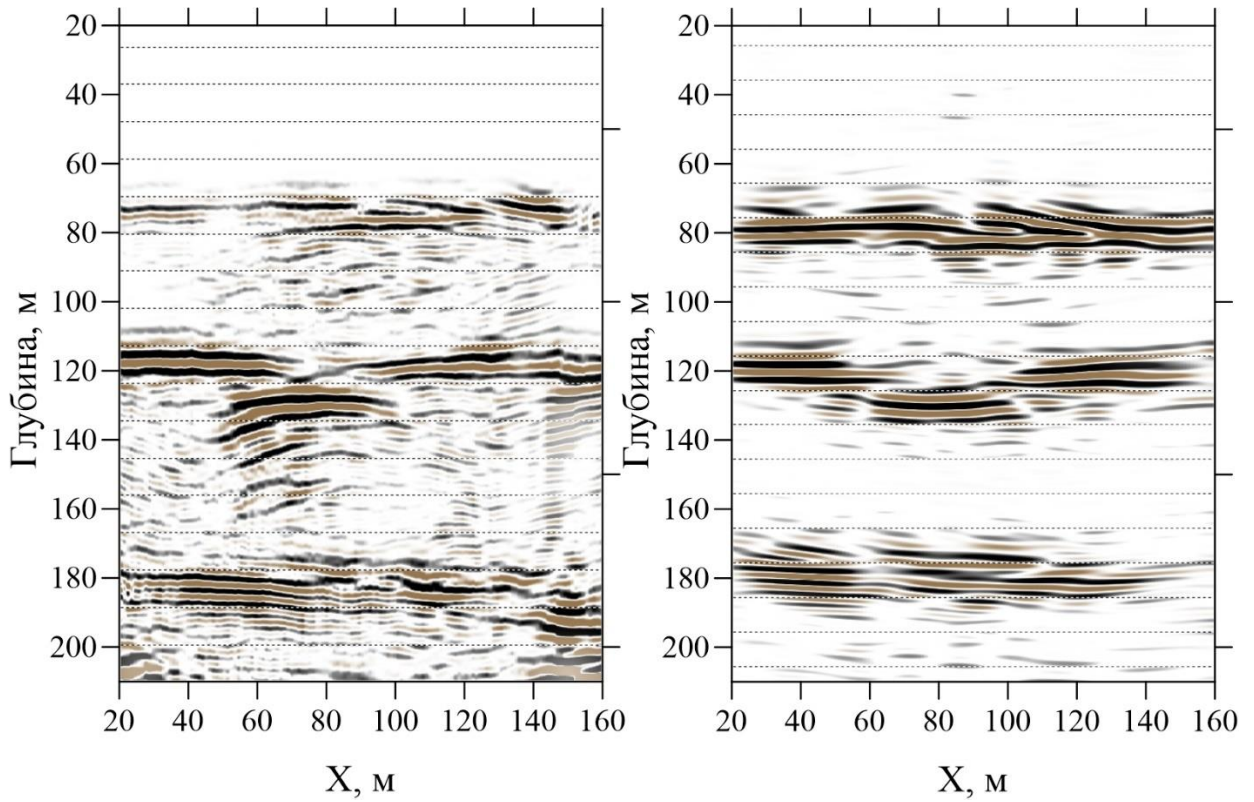


Рисунок 2.19 – Суммарный глубинный разрез и результат применения миграции Столта

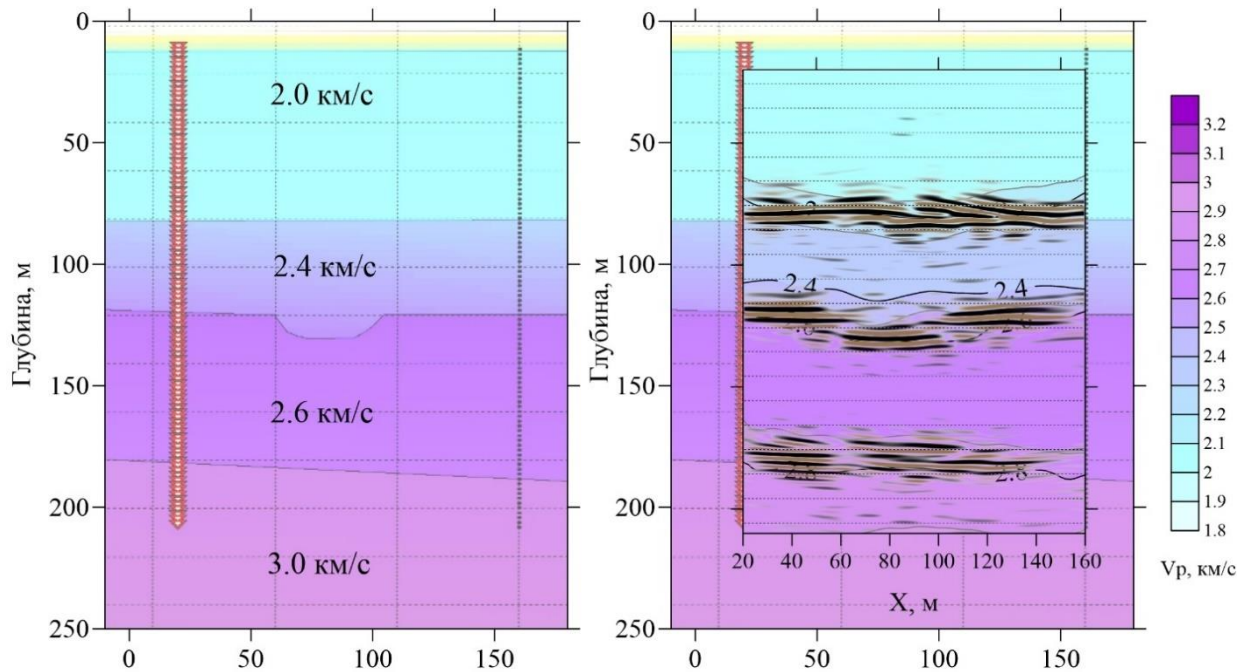


Рисунок 2.20 – Совмещение исходной модели, конечного глубинного и скоростного разрезов

2.1.6. Моделирование объема Френеля отраженных волн

Для оценки разрешающей способности и пространственного распространения скважинных сейсмических исследований на отраженных волнах выполнено моделирование объема Френеля в типичной для ВКМС сейсмогеологической модели. Результаты моделирования при отражении от границы, расположенной в соляной толще на глубине 250 м (40 м ниже кровли ПКС) и при положениях ПВ и ПП 140 и 190 м приведены на рисунке 2.21.

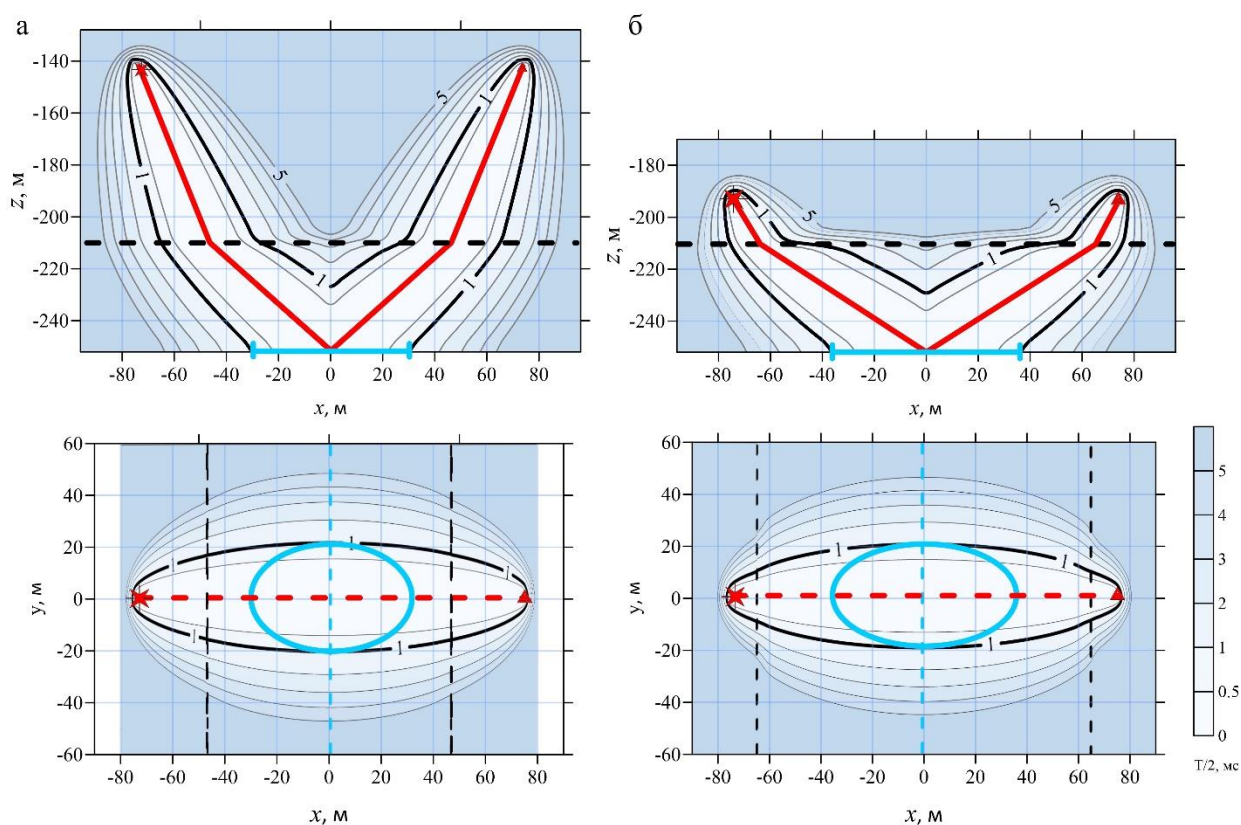


Рисунок 2.21 – Сечение объема Френеля отраженной волны при глубине источника и приемника 140 м (а) и 190 м (б)

Анализируя результаты необходимо отметить, что при фиксированной частоте большой диаметр отражающей площадки растягивается при приближении линии наблюдения к отражающей границе за счет увеличения угла падения в соответствии с выражением (1.4). С другой стороны, необходимо учитывать, что в реальной геологической среде частота сигнала при увеличении длины луча будет падать. Для более точной оценки разрешающей способности отраженных волн при межскважинных

исследованиях необходимо дальнейшее изучение соотношения указанных факторов.

Результаты моделирования позволяют оценить поперечные размеры объема Френеля отраженных волн по оси y и суммарных разрезов, получаемых с их помощью при межскважинном просвечивании. Так, при расстоянии между скважинами 150 м и частоте сигнала 500 Гц эффективная толщина массива по оси y , принимающая участие в отражении, составляет 40 м (отклонение до 20 м в обе стороны от плоскости просвечивания).

В таблице 2.2 и на рисунке 2.22 приведены результаты расчетов объема Френеля для отраженных волн в соляной и надсоляной толще для типичных сейсмогеологических условий ВКМС.

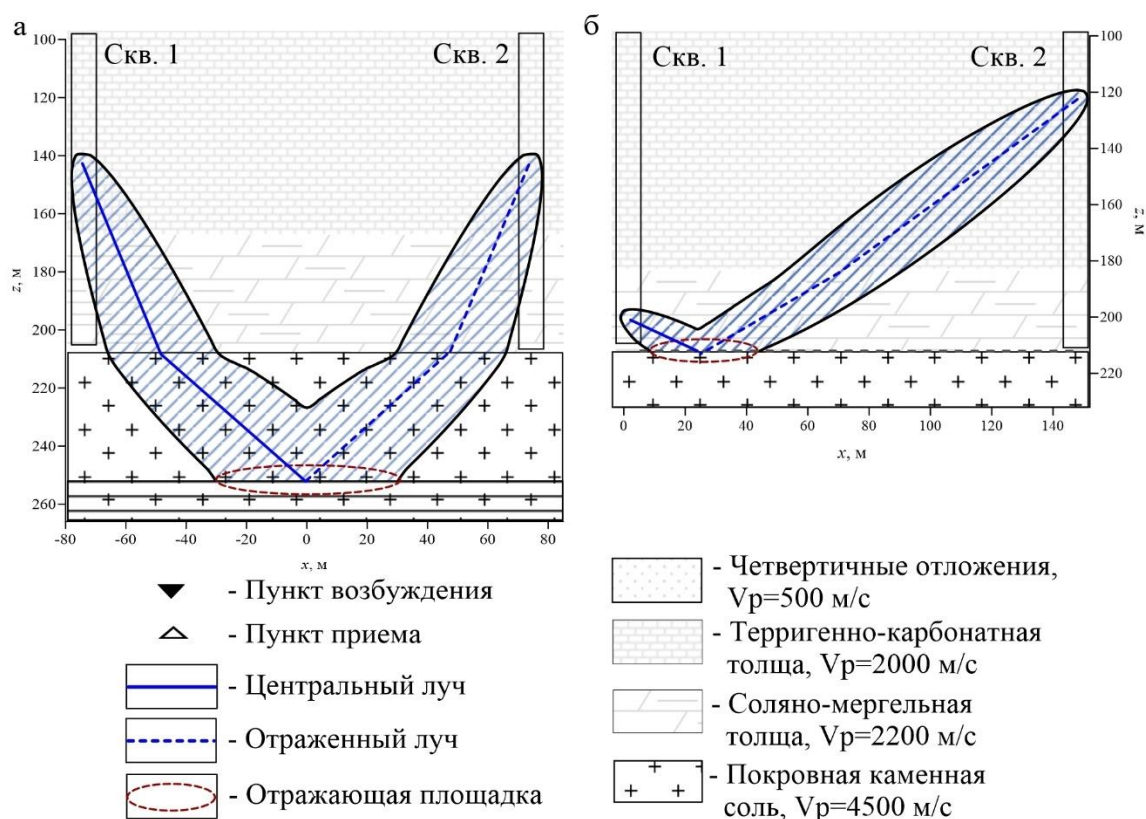


Рисунок 2.22 – Определение размеров отражающих площадок для отраженных волн при МСП: (а) – отраженная волна от границы в соляной толще, (б) – отраженная волна в надсоляной толще или от кровли соли.

Таблица 2.2 – Параметры глубинных сейсмических разрезов, определенные способом моделирования объема Френеля

Методика	Частота сигнала, Гц	Длина волны, м	Разрешающая способность вдоль отражающей границы, м	Размеры разреза по координате у
Отраженные волны в методе межскважинного просвечивания, галогенная толща (рисунок 2.22а)	500	9	30-40	30-40
Отраженные волны в методе межскважинного просвечивания, надсолевая часть (рисунок 2.22б)	400	5	7-15	15-40

2.2. Головные преломленные волны при изучении околоскважинного пространства

При проведении межскважинных исследований в сейсмогеологических условиях Верхнекамского месторождения регистрируются преломленные головные волны, изучение которых позволяет расширить арсенал методов получения сейсмогеологической информации. Граница между соляно-мергельной толщей (СМТ) и покровной каменной солью (ПКС) имеет высокую акустическую контрастность (скорости 2.0-2.4 км/с и 4.4-4.6 км/с соответственно), что создает условия для формирования интенсивных головных волн. В условиях пластового месторождения и высокой пластичности солей, эта граница хорошо выдержана. При наличии сильной складчатости в соляной залежи или в терригенных отложениях, и даже в случае дизъюнктивных нарушений, кровля солей является наиболее пологой границей во всей толще и имеет также название «соляное зеркало».

Гладкость этой границы при расстояниях до первых сотен метров и малые углы падения позволяют в большинстве случаев считать ее плоской, а все углы выхода головной волны – равными.

Угол наклона границы, как правило, определяется по априорным данным о структурных отметках кровли ПКС. При направлении линии просвечивания вкост падения пласта (когда видимый наклон границы

минимален), боковой снос преломляющей границы максимален и равен $dy = H \sin(\psi)$, где ψ – угол падения пласта в плоскости z-y. При расстояниях от средней глубины источник-приемник до границы не превышающих 100 м, и углах наклона границы до 4° , боковой снос составляет не более 7 м, соответственно его можно не учитывать.

Лучевая схема образования головных волн на кровле соляной толщи приведена на рисунке 2.23. Их энергия примерно на 10-14 дБ меньше, чем прямых проходящих волн. Однако, при пунктах возбуждения вблизи этой границы (на удалении от границы не более не более 50-70 м) они регистрируются раньше других волн, благодаря чему достаточно хорошо различимы, и с помощью различных техник накапливания, которые будут описаны в текущей главе, могут быть использованы для изучения околоскважинного массива, а также границы, на которой они формируются.

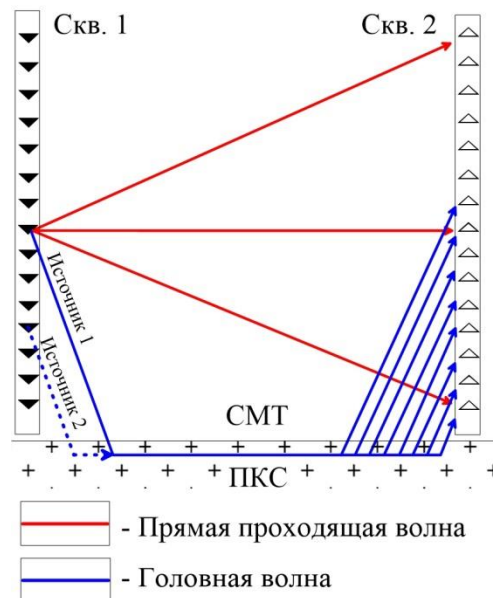


Рисунок 2.23 – Схема распространения лучей при межскважинном просвечивании

По линии межскважинного просвечивания головные волны имеют плоский фронт. На сейсмограммах годограф головной волны имеет обратный наклон, т.е. раньше всего волна приходит на самые нижние датчики. При удалении пункта возбуждения от преломляющей границы время регистрации

головной волны увеличивается, однако форма годографа не меняется (рисунок 2.24).

Изучение годографа головных волн используется для получения скоростной характеристики вдоль ствола скважины. В сортировке общего пункта возбуждения можно получить информацию о приемной скважине, а в сортировке общего пункта приема – о скоростях в окрестностях возбуждающей скважины.

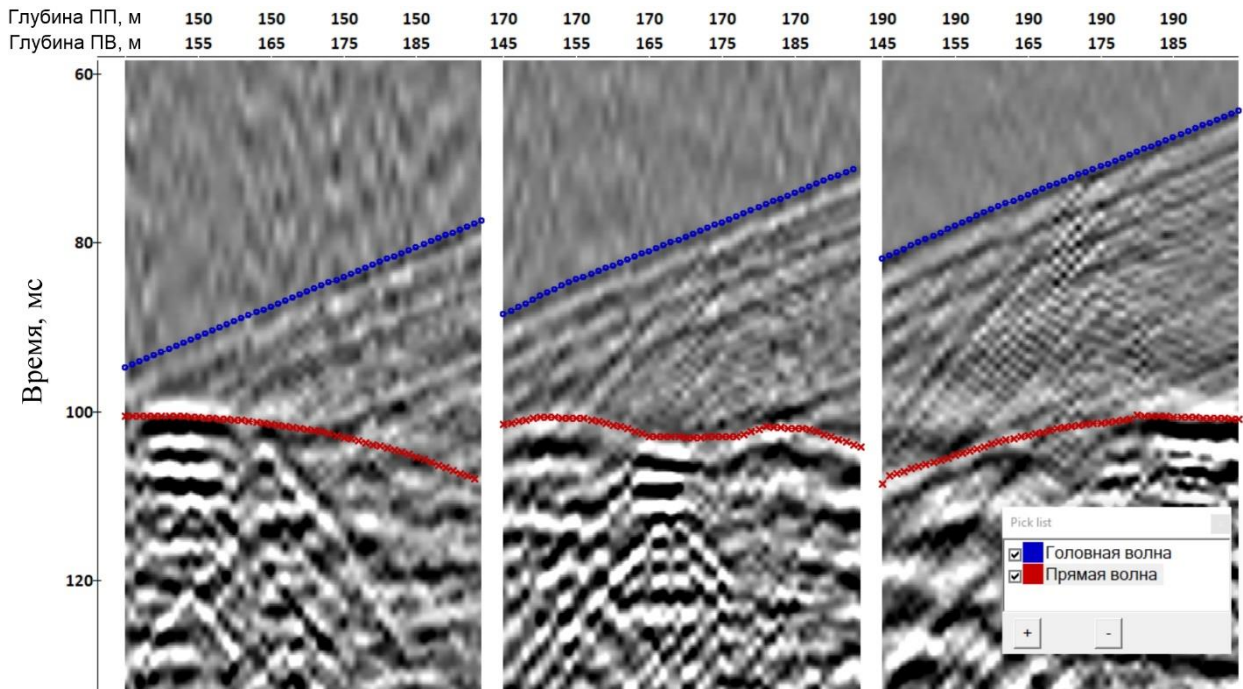


Рисунок 2.24 – Сейсмограммы ОПВ при межскважинном просвечивании

2.2.1. Получение скоростной характеристики вдоль ствола скважины

Пусть V_1 – скорость волн в верхнем полупространстве, V_2 – в нижнем, а преломляющая граница имеет угол падения φ (рисунок 2.25). Примем, что при падении пласта от приемной скважины угол φ положителен, а при восстании – отрицателен; для возбуждающей скважины - наоборот.

Соотношение скоростей V_1 и V_2 определяет значение первого критического угла выхода головной волны на основании закона Снеллиуса:

$$\frac{V_1}{V_2} = \sin i, \quad (2.9)$$

а кажущаяся скорость головных волн по сейсмограммам в скважине V_k и скорость в среде связаны на основании закона Бендорфа:

$$\frac{V_1}{V_k} = \cos(i - \varphi) . \quad (2.10)$$

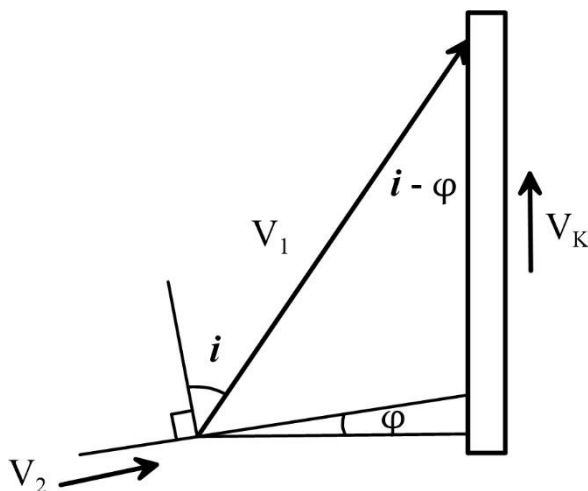


Рисунок 2.25 – Схема регистрации головной волны при наклонном залегании преломляющей границы

Используя формулу косинуса разности аргументов, перепишем последнее выражение:

$$\frac{V_1}{V_k} = \cos(i) \cos(\varphi) + \sin(i) \sin(\varphi) . \quad (2.11)$$

При углах падения от 0° до 8° $\cos(\varphi) = (0.99 \div 1)$, поэтому для указанных углов падения примем $\cos(\varphi) = 1$.

Тогда, с учетом выражения (2.9), можно записать:

$$\frac{V_1}{V_k} = \sqrt{1 - \frac{V_1^2}{V_2^2}} + \frac{V_1}{V_2} \sin(\varphi) \quad (2.12)$$

Данное выражение связывает скорости V_1 и V_2 в среде, угол падения преломляющей границы φ и значение кажущейся скорости V_k , определяемой по годографу первых вступлений в скважине. Нечетность функции $\sin(\varphi)$ обеспечивает правильность выбора знака при втором слагаемом правой части выражения.

В условиях плоскослоистой среды, по закону Снеллиуса параметр луча не меняется, поэтому несложно показать, что в выражении (2.12) можно

заменить V_1 и V_k на $V_1(h)$ и $V_k(h)$, где h – глубина приемников. Для простоты записи, там, где это не играет роли, будет использована сокращенная запись.

Формально, в выражении (2.12) неизвестных параметров три: V_1 , V_2 и φ . Приведем выражения пересчета каждого из неизвестных параметров через два других:

скорость в околоскважинном пространстве на глубине h :

$$V_1(h) = \frac{V_2 V_k(h)}{\sqrt{V_2^2 + V_k^2(h) - 2V_2 V_k(h) \sin(\varphi)}}; \quad (2.13)$$

скорость в нижнем слое:

$$V_2 = \frac{V_1 V_k \sqrt{V_k^2 - V_1^2} + 2V_1^2 V_k \sin\varphi}{V_k^2 - V_1^2}; \quad (2.14)$$

угол падения:

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{V_2}{V_k} - \sqrt{\frac{V_2^2}{V_1^2} - 1}\right). \quad (2.15)$$

Отдельно рассмотрим влияние всех трех неизвестных параметров на значение кажущейся скорости:

$$V_k(h) = \frac{V_1(h) V_2}{V_1(h) \sin(\varphi) + \sqrt{V_2^2 - V_1^2(h)}} \quad (2.16)$$

Анализ данной формулы показывает, что увеличение скорости во вмещающей среде $V_1(h)$ приводит к увеличению $V_k(h)$, а увеличение скорости V_2 и угла падения - к уменьшению V_k . Причем наибольшее влияние оказывает изменение скорости V_1 : при $V_1 = 2200$ м/с и $V_2 = 4400$ м/с увеличение скорости V_1 на 10% вызывает увеличение V_k на 12%. Уменьшение V_2 на 10% вызывает увеличение V_k на 5%, а увеличение угла падения на 5° приводит к уменьшению V_k на 5%.

Скорость V_1 характеризует состояние массива в непосредственной близости от ствола скважины и не зависит от азимутального направления прихода волны, в то время как V_2 и φ отражают состояние массива в области

образования головной волны на границе высокоскоростного слоя в плоскости просвечивания.

Полученные формулы являются основой для определения физико-геометрических характеристик массива.

2.2.2. Определение скорости в кровле солей

Скорости в кровле солей на определенной площади можно определить с высокой степенью точности способом t_0 [Гамбурцев, 1952], модифицированным для применения в скважинах. Необходимым условием для осуществления данного способа является наличие инклинометрии скважин для определения пространственных координат пунктов приема и возбуждения в скважинах.

При наличии нескольких линий просвечиваний вне зависимости от их азимутальной ориентации по каждой паре скважин выбирается трасса с фиксированной глубиной источника и приемника, одинаковой для каждого просвечивания, на которой отмечается время первого вступления головной волны. Отсортировав эти значения по удалению, можно получить виртуальный годограф преломленной головной волны (рисунок 2.26).

Такой подход позволяет опустить уровень наблюдений максимально близко к преломляющей границе. Высокая частота сигнала в скважинах способствует повышению точности определения времени вступления головной волны.

В приведенном примере годограф получен на основании 11 просвечиваний в 8-ми скважинах. Выбраны трассы с одинаковой глубиной источника и приемника равной 191 м, по которым определены времена первых вступлений головной волны. Коэффициент вариации при линейной аппроксимации годографа составил 0,9982, что позволило получить значение скорости в кровле ПКС $V_2 = 4513 \pm 42$ м/с при допуске 95%. Погрешность определения скорости, таким образом, составила $\pm 0.9\%$.

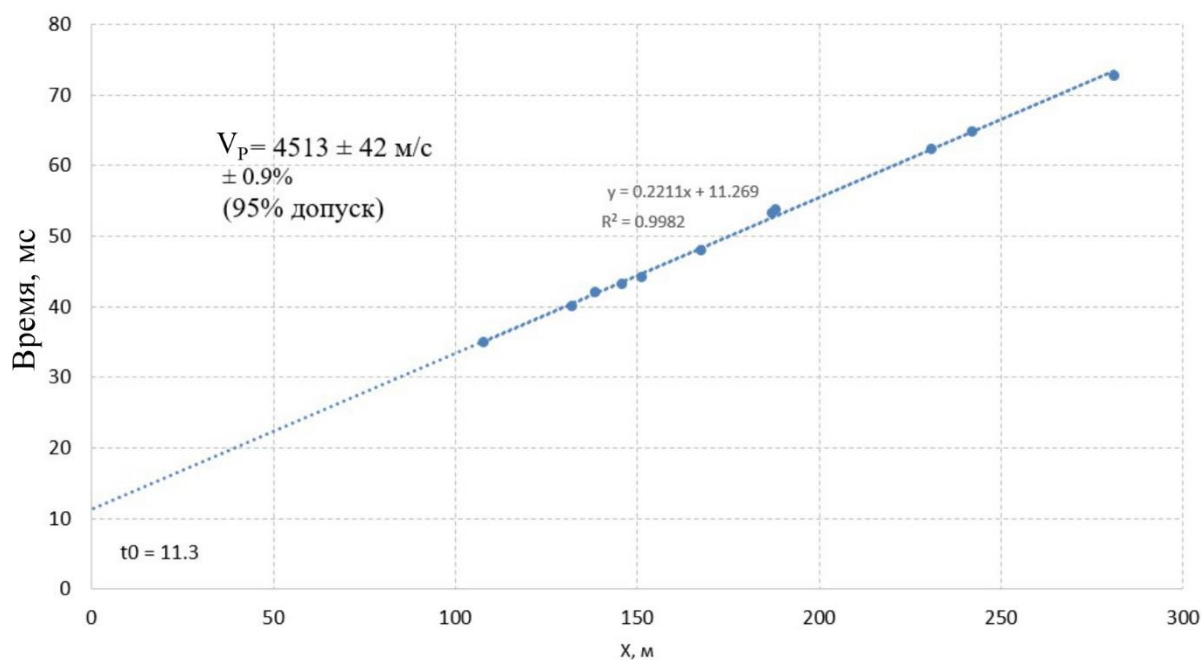


Рисунок 2.26 – Определение скорости кровли солей методом T_0 в скважинах

2.2.3. Проявление физико-геологических аномалий в скоростях головных волн

Рассмотрим некоторые варианты проявления физико-геологических аномалий в поле головных волн. Моделирование выполнено двумя способами: на основании выражения 2.16 и в полноволновом варианте. Варианты сгруппированы на основании схожести образуемой формы годографов. На рисунке 2.27а приведено моделирование для ненарушенного массива.

1. Слой повышенной скорости в верхнем полупространстве (рисунок 2.27б).
Изменение скорости пласта будет вызывать повышение кажущейся скорости в соответствии с выражением 2.16, при этом значимого изменения амплитуд первых вступлений не наблюдается. Присутствуют преломленно-отраженные волны, берущие начало на точках изгиба годографа (желтый маркер).
2. Низкоскоростная неоднородность в нижнем пласте (рисунок 2.27в) – на участке контакта низкоскоростного участка с верхним слоем угол выхода головная волна будет меньше, при этом годографе возникает излом, с участком повышенной кажущейся скорости и повышенных амплитуд за

счет интерференции головных волн от разных участков преломляющей границы.

3. Складка с участком падения в сторону линии регистрации (рисунок 2.27Г): на годографе также наблюдается участок повышенной кажущейся скорости, но в отличие от предыдущего варианта, головная волна от наклонного участка границы будет регистрироваться нижними датчиками, осложняя волновую картину и вызывая увеличение времени регистрации на нижних датчиках. Точка перегиба на границе будет являться точкой дифракции, отвечающей за формирование первых вступлений на участке повышенной скорости (зеленый маркер).

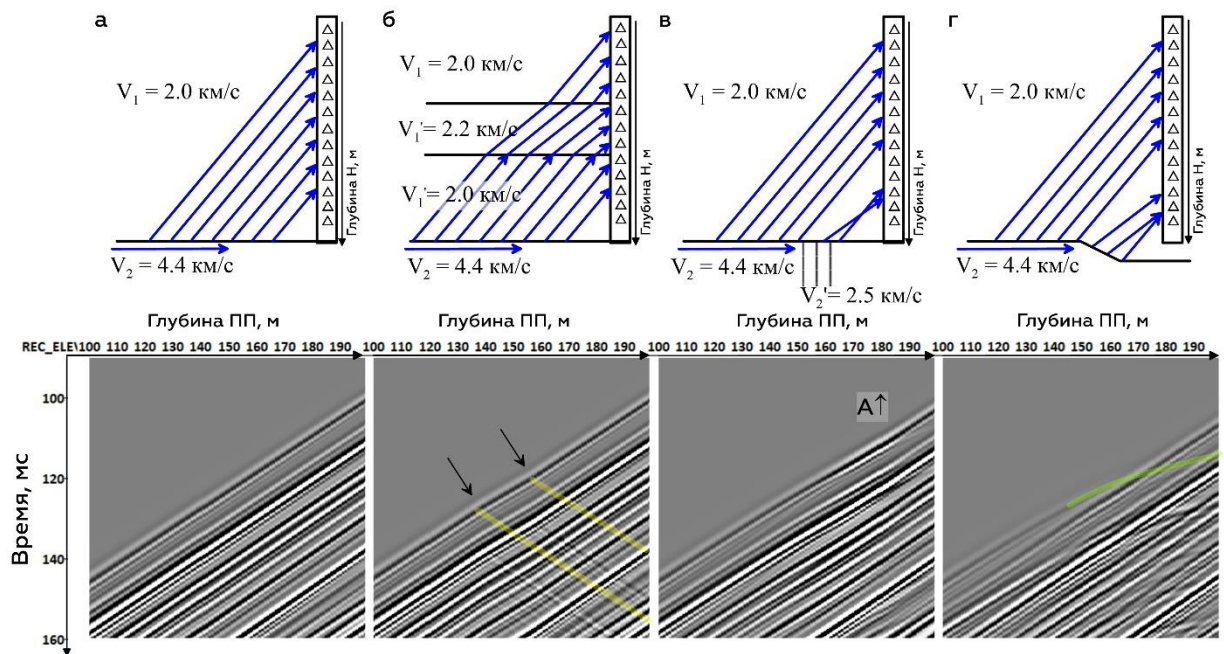


Рисунок 2.27 – Моделирование лучевой картины синтетические сейсмограммы, для случаев, приводящих к увеличению кажущейся скорости

Как видно, все три вышеуказанных варианта будут вызывать схожее изменение времен первых вступлений головной волны, однако волновая картина будет отличаться, что позволяет разделить все три случая.

4. Слой пониженной скорости в верхнем полупространстве (рисунок 2.28а). Увеличение скорости пласта будет вызывать увеличение кажущейся скорости на соответствующем участке, значимого изменения амплитуд

первых вступлений не ожидается. Также, как для случая со слоем повышенной скорости возникают преломленно-отраженные волны (желтый маркер).

- Складка с падением от линии регистрации (рисунок 2.28б) вызывает излом годографа первых вступлений, с уменьшением амплитуд и кажущейся скорости.

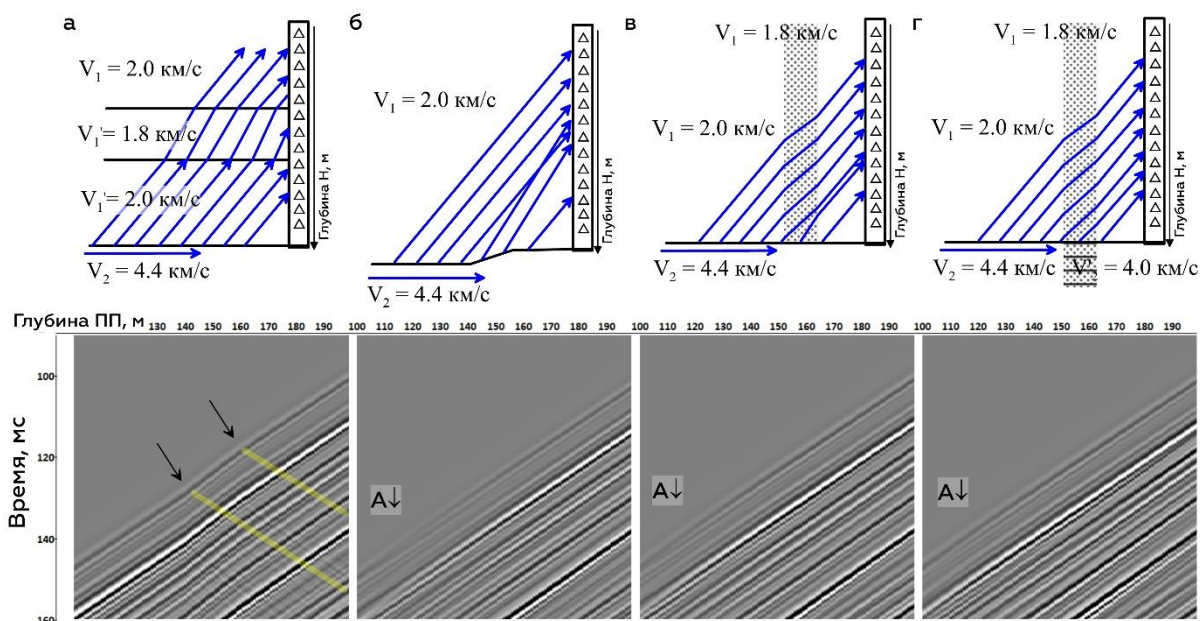


Рисунок 2.28 – Моделирование лучевой картины и годографов, приводящих к уменьшению кажущейся скорости

- Вертикальная ослабленная зона в верхнем полупространстве (рисунок 2.28в). Уменьшение скорости на 10% будет вызывать излом годографа первых вступлений, с уменьшением кажущейся скорости до 13%.
- Вертикальная ослабленная зона, затрагивающая верхний и нижний слои (рисунок 2.28г). Уменьшение скорости на 10% будет вызывать излом годографа первых вступлений, с уменьшением кажущейся скорости на 10%.
- Три последних варианта будут вызывать очень похожие изменения регистрируемого волнового поля, и разделение данных вариантов требует привлечения дополнительной информации. Это может быть, например, освещение скважины с различных азимутов, в результате чего можно

разделить влияние скоростных неоднородностей вблизи скважины и факторов, относящихся к высокоскоростному слою.

В качестве примера реализации методики получения скоростной модели с помощью головных волн приведем данные, полученные на одном из объектов Верхнекамского месторождения. В четырех скважинах проведено три просвечивания таким образом, что одна скважина для всех просвечиваний общая (рисунки 2.29, 2.30).

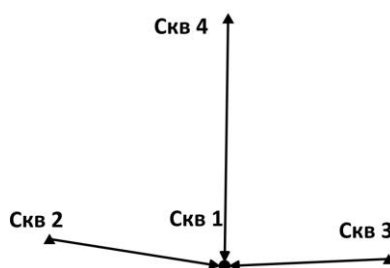


Рисунок 2.29 – Схема расположения скважин (в плане)

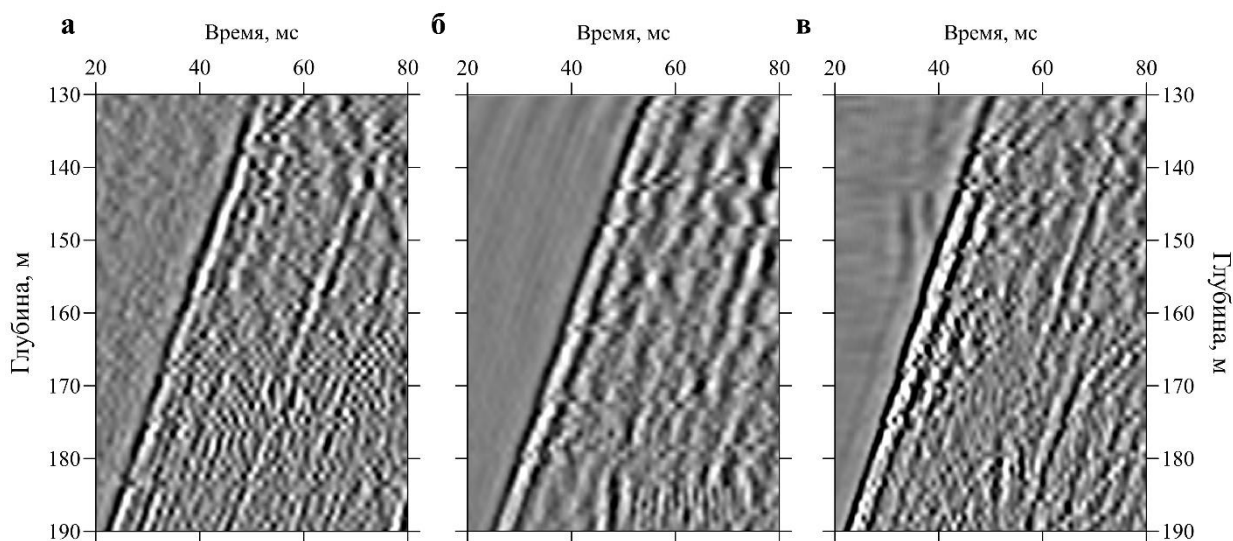


Рисунок 2.30 – Сейсмограммы с первыми вступлениями головных волн у скважины 1 по трем различным просвечиваниям

Значение скорости в соляной толще определено в пп. 2.2.2. и составляет 4500 м/с, углы падения границы преломления относительно изучаемой скважины определены на основании априорной информации об этой границе. Эти данные позволили получить скоростную характеристику вдоль скважины по каждому просвечиванию и выполнить сравнение (рисунок 2.31а). На основании трех измерений получена статистическая оценка стандартного

отклонения, нормированная относительно среднего значения и выраженная в процентах [Алексеев, 1972]:

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\bar{V}} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (V_j - \bar{V})^2} * 100\%$$

Распределение стандартного отклонения по глубине приведена на рисунке 2.31б. Значения стандартного отклонения находятся в пределах от 1 до 5%, среднее значение составляет 3%. Такой показатель позволяет получать скоростную оценку с погрешностью $\pm 2-10\%$ при достоверности 95%.

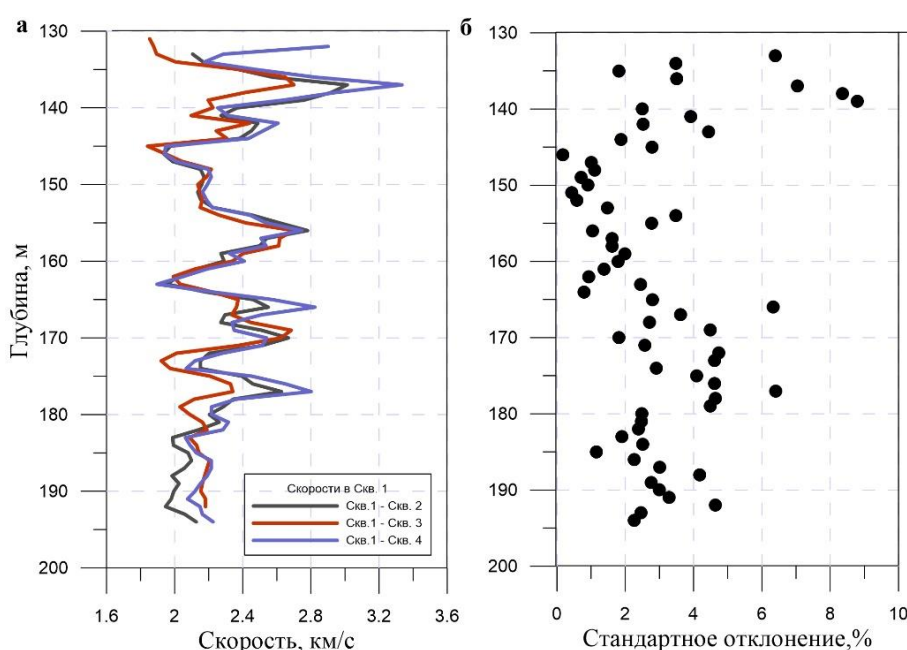


Рисунок 2.31 – Сравнение скоростей в скважине 1, полученных по трем просвечиваниям (а) и распределение стандартного отклонения по трем наблюдениям (б)

Амплитудный спектр головных волн при МСП намного шире, чем при наблюдениях ВСП, в частности, в представленных просвечиваниях максимум спектра первых вступлений головной волны составляет 270-300 Гц при расстояниях между скважинами 150-250 м. Максимум спектра прямой волны в ВСП на глубинах 130-200 м не превышает 100 Гц. Таким образом, вертикальная разрешающая способность предложенного способа получения

скоростной характеристики над преломляющей границей существенно выше по сравнению с методом определения скоростей в методе продольного ВСП.

2.2.4. Суммирование головных волн

Стандартные сейсмические наблюдения подразумевают применение систем многократных наблюдений. При межскважинном просвечивании, как правило, это означает отработку всех возможных комбинаций положений пунктов возбуждения и приема. В этом случае годографы головной волны на сейсмограммах общего пункта возбуждения будут повторять друг друга с постоянным смещением по времени, за счет приближения пунктов взрыва к кровле ПКС, и фактически можно сформировать только 2 сейсмограммы – прямую, в сортировке по общему пункту возбуждения, и обращенную, в сортировке по общему пункту приема, которые будут нести информацию о скоростной характеристике массива, соответственно, у приемной и излучающей скважины. Лучевая картина представлена на рисунке 2.32.

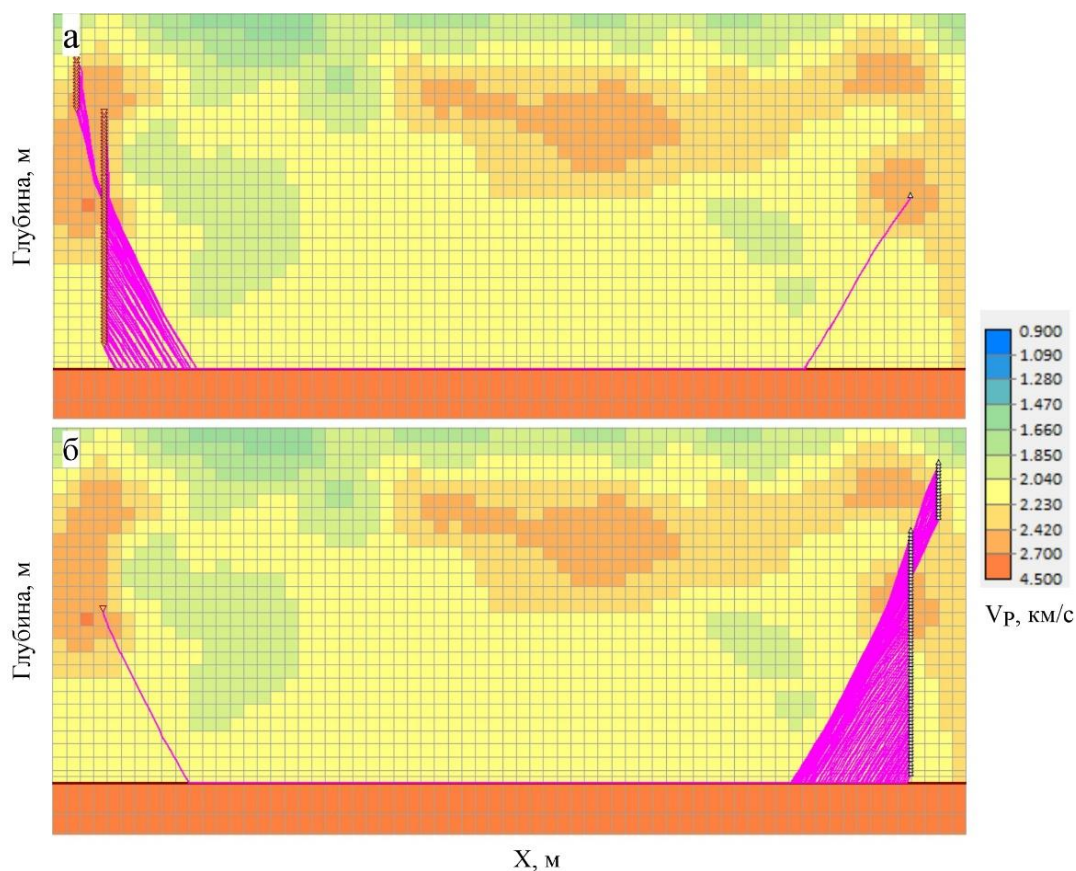


Рисунок 2.32 – Схема лучевого покрытия для головной волны в сортировке общего ПП (а) и ПВ (б)

Как правило, при межскважинном просвечивании применяется система наблюдений с равным шагом пунктов приема и возбуждения ($X_{ПВ} = X_{ПП} = 1$ м). Поэтому, на основании принципа взаимности, сортировки ОПП и ОПВ будут равноправны. Благодаря этой симметрии все приведенные в разделе операции выполняются дважды, для получения информации в окрестностях как приемной, так и излучающей скважины.

Регистрация головных волн при межскважинных наблюдениях, по сравнению с наземным вариантом, отличается отсутствием смещения расстановки по горизонтали вдоль преломляющей границы. Соответственно, имеется неподвижная приемная расстановка и перемещающийся пункт возбуждения колебаний. При смещении пункта возбуждения за счет неизменности приемной линии, геометрия хода лучей в области приемной скважины также будет неизменной, следовательно, регистрируется статичное поле головной волны со смещением по времени в сторону начала записи за счет приближения излучателя к кровле преломляющего слоя. Вместе с тем, время регистрации прямой проходящей волны, распространяющейся в верхнем относительно низкоскоростном слое, будет меняться незначительно (см. рисунок 2.24). Следовательно, имеется возможность усиления головной волны за счет суммирования и накопления сигнала при разных положениях пункта возбуждения с подавлением других классов волн.

Многократное возбуждение сейсмического сигнала на одной точке с целью накопления и повышения отношения сигнал/шум является стандартной процедурой, однако при этом подразумевается, что энергия каждого накопления постоянна. [Maune, 1962; Мешбей, 1973]. Для головной волны, при удалении источника от кровли ПКС, отношение сигнал/шум уменьшается с каждым шагом. На нижних датчиках его значение может составлять более 10, в то время как на верхних датчиках может составлять меньше 1. При суммировании сигналов различной энергии для получения сейсмического изображения наилучшего качества необходимо решить задачу определения базы суммирования.

Критерием выбора суммируемых трасс является максимизация отношения сигнал-шум (S/N) суммарного волнового поля. Пусть q – коэффициент ослабления сигнала, равный усредненному отношению энергий полезного сигнала на соседних пикетах ($0 < q < 1$). Энергию суммарного поля трасс, содержащих затухающий сигнал, можно найти как сумму членов геометрической прогрессии со знаменателем прогрессии q , а рост энергии случайного шума пропорционален \sqrt{n} , где n – количество суммированных трасс [Мешбей, 1973]. Тогда отношение сигнал-шум суммарного волнового поля будет иметь вид

$$S/N = \frac{1 - q^n}{(1 - q)\sqrt{n}} \quad (2.17)$$

В графическом виде данное выражение при заданном q представлено на рисунке 2.33. Из графика видно, что при затухании сигнала с ростом количества трасс в сумме, значение S/N суммарного волнового поля ограничено некоторым пределом, после которого итоговый сигнал начинает ухудшаться.

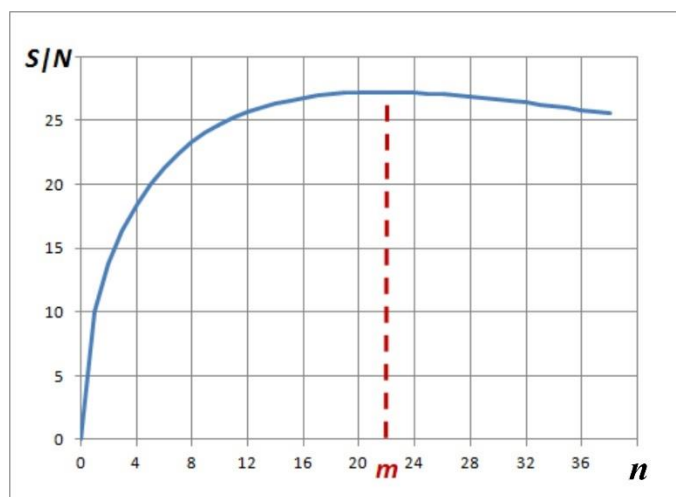


Рисунок 2.33 – Зависимость отношения S/N суммарного волнового поля от количества суммируемых трасс при экспоненциальном затухании сигнала

Экстремум этой функции позволяет определить m – количество трасс, при котором суммирование дает максимальное улучшение полезного сигнала. С помощью анализа выражения 2.17 построена зависимость оптимального

количества каналов в сумме от коэффициента ослабления сигнала q на соседних трассах (рисунок 2.34а).

Кроме того, исследована связь коэффициента ослабления q и отношения энергий самого сильного (E_1) и самого слабого (E_m) сигнала в наборе суммируемых трасс $\eta = E_1/E_m$. На рисунке 2.34б приведен кросс-плот зависимости η от q . С ростом q допустимый разброс энергий растет и принимает максимальное значение $\eta \approx 3.51$ при $q \rightarrow 1$. Минимальное значение η для каналов больше одного равно 1,67. Полученные зависимости могут служить общим критерием выбора базы суммирования сигналов одинаковых по форме, но с различной энергией.

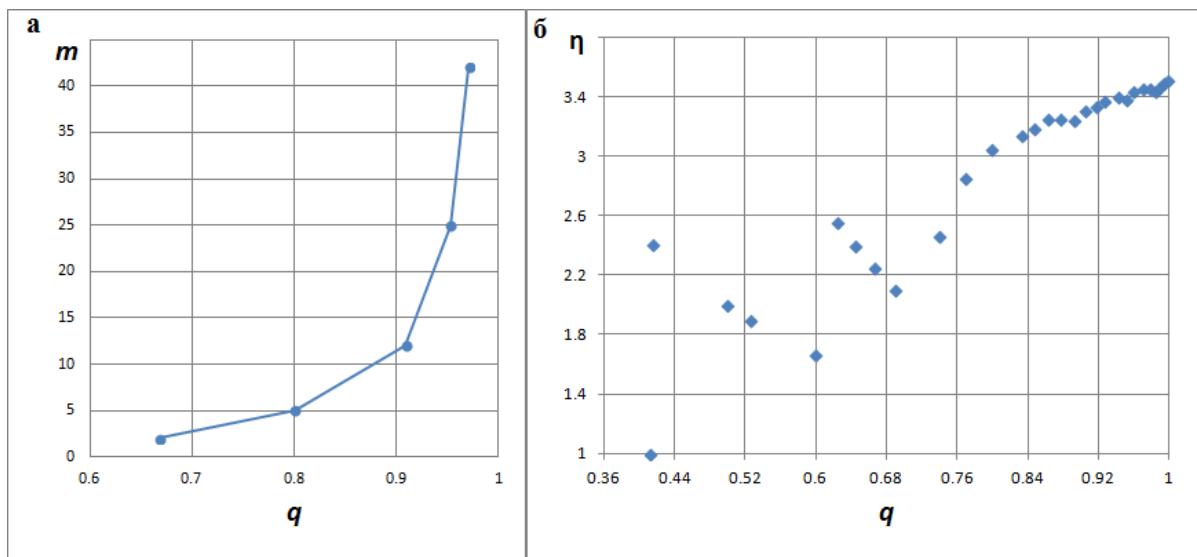


Рисунок 2.34 – Зависимость от коэффициента ослабления: **а** – количество трасс в сумме обеспечивающее максимальное значение S/N; **б** - отношение максимальной и минимальной энергий сигналов в таком наборе

Таким образом, при накоплении равномерно затухающего сигнала, отношение максимальной и минимальной энергий в наборе не должно превышать определенного значения, находящегося в пределах от 1,67 до 3,51 и зависящего от коэффициента ослабления сигнала.

Суммирование головных волн при межскважинном просвечивании состоит из нескольких этапов:

1. Подготовка волнового поля и подавление волн помех, к которым в данном случае относятся прямые, отраженные и обменные волны. Подавление выполняется с помощью пространственно-временной фильтрации.
2. Введение поправки за положение источника возбуждения, поправка может быть найдена через сортировку общего пункта приема – в такой сортировке она определяется по годографу первых вступлений для нижнего приемника. Схема введения поправки приведена на рисунке 2.35;
3. Выбор базы суммирования, определяется итеративно путем выполнения этапов 3 – 5.
4. Суммирование преломленных головных волн. После введения поправки за положение пункта возбуждения, годографы головной волны на всех сейсмограммах находятся на одном времени, что позволяет выполнить суммирование.
5. Оценка качества суммирования и пост-обработка конечной суммы (рисунок 2.36). Оценивается отношение сигнал/шум и частотный состав результирующей суммы.

Суммирование головных волн позволяет повысить точность определения времен первых вступлений, применяемых для определения скоростной характеристики по методике, описанной в разделе 2.2.1, кроме того, высокое значение отношения сигнал/шум позволяет проводить анализ вторичного волнового поля, в частности преломленно-отраженных волн, возникающих на горизонтальных границах при прохождении преломленной головной волны.

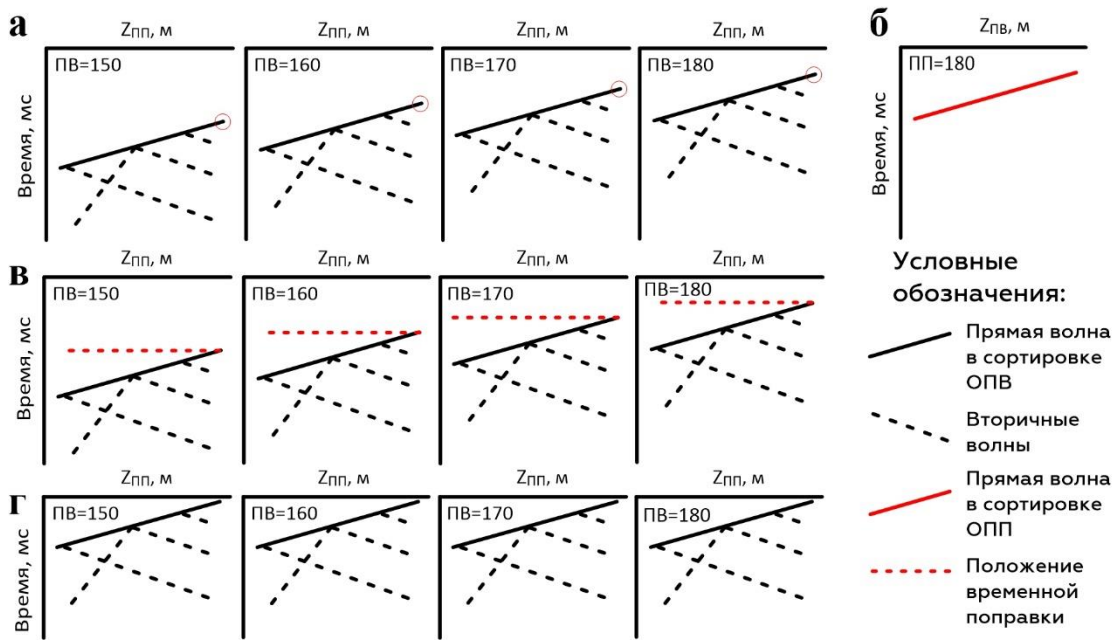


Рисунок 2.35 – Схема введения поправки за положение источника возбудений: а – первоначальное положение годографов в сортировке ОПВ; б – годограф в сортировке ОПИ; в – положение временных поправок в сортировке ОПВ; г – результат введения поправки. $Z_{пп}$ – глубина приемника, $Z_{пв}$ – глубина источника.

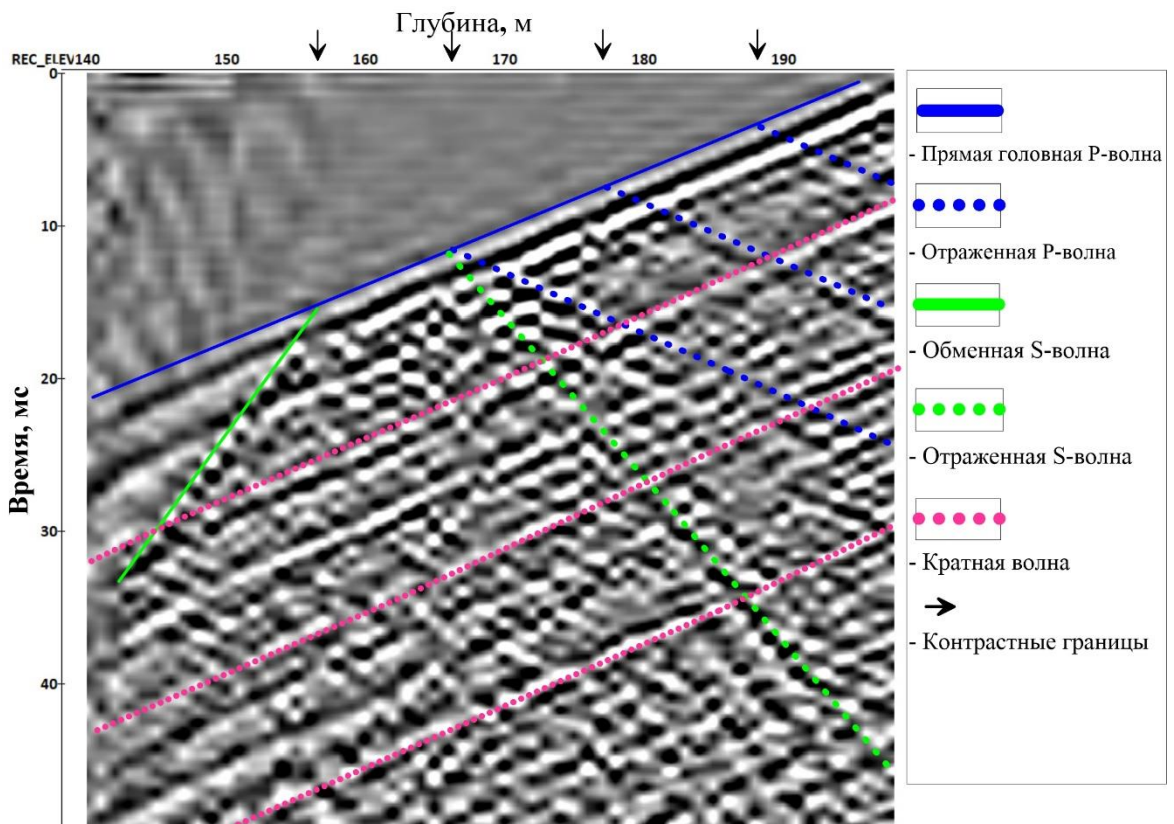


Рисунок 2.36 – Результирующая суммарная сейсмограмма головных волн по пунктам возбуждения (суперсейсмограмма)

2.2.5. Получение глубинного сейсмического разреза с помощью преломленно-отраженных волн

Рассмотрим волновое поле, полученное в результате суммирования головных волн. Первые вступления здесь представлены продольной головной волной, которая, проходя сквозь массив, возбуждает вторичные волны, образующиеся на акустических границах, в приведенном примере представленных субгоризонтальными прослоями гипса мощностью 1-2 м. В полном соответствии с классической теорией, наблюдаются отраженные Р и S волны, а также проходящая обменная S-волна. Помимо этого, возникают кратные волны, возникающие между кровлей ПКС и первой снизу акустически контрастной границей. Схемы хода лучей вторичных волн приведены на рисунке 2.37.

Наиболее интересными здесь являются отраженные Р-волны, которые несут информацию об акустических свойствах точек массива, где они образуются, что позволило разработать методику построения глубинного сейсмического разреза.

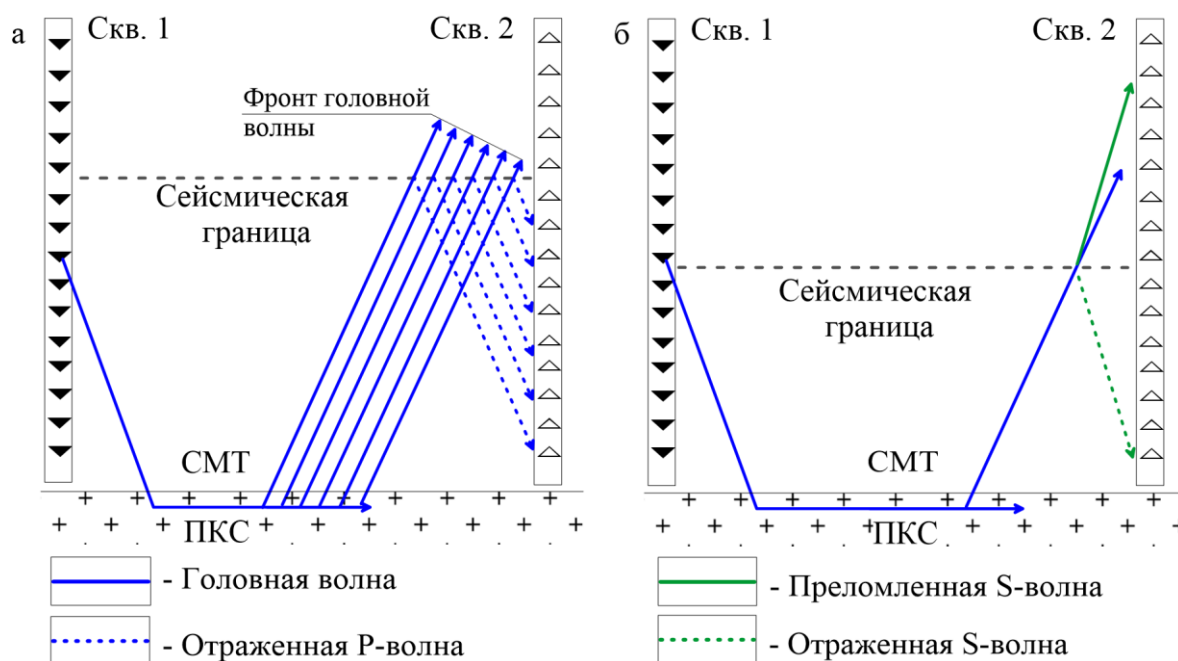


Рисунок 2.37 – Лучевые схемы хода лучей головных волн и вторичного волнового поля в межскважинном пространстве: а – преломленно-отраженная волна, б – обменная и отраженная S-волны

На первом этапе с помощью пространственно-временной фильтрации выделяется поле отраженных волн (рисунок 2.38а). Для преобразования поля к виду, когда отражения от границ, находящихся на одной глубине, регистрируются на одном времени, необходимо ввести кинематическую поправку, которая равна времени первых вступлений прямой головной волны (рисунок 2.38б), по аналогии с методикой получения трассы коридорного суммирования в методе ВСП. В отличие от первых вступлений головной волны, которые несут информацию о скорости продольных волн непосредственно близки скважины, отраженные волны отображают пространственное распределение акустических свойств среды в области существования головной волны вблизи скважины.

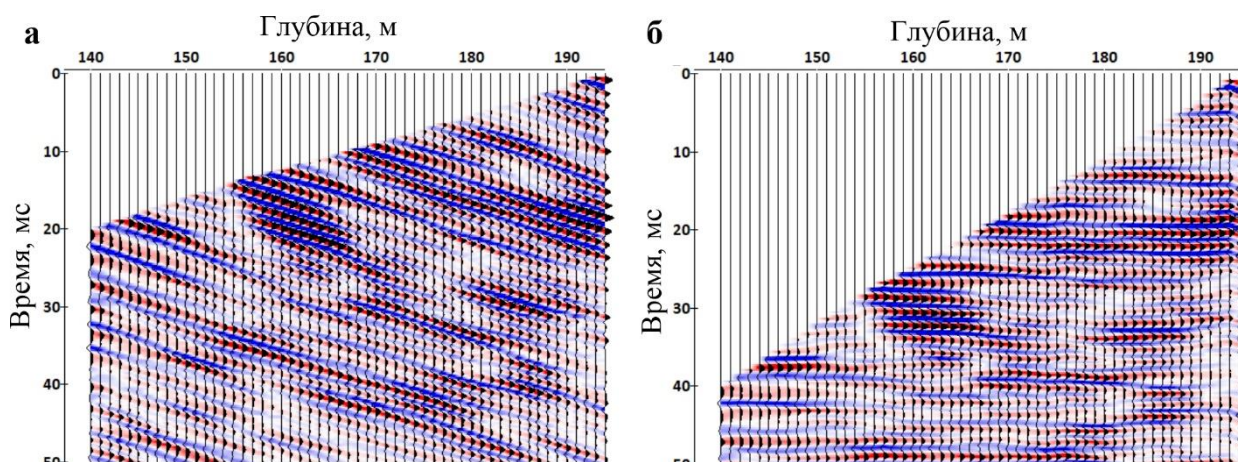


Рисунок 2.38 – Поле отраженных Р волн: а – после фильтрации, б – после введения кинематики

Получение глубинного сейсмического разреза из поля преломленно-отраженных волн выполняется путем линейной миграции – с помощью привязки поля отраженных волн к координатной сетке межскважинного пространства на основании следующих известных данных (рисунок 2.39):

- 1) линия, соединяющая точки 1 и 2, является линией первых вступлений, и значит, в пространстве совпадает со скважиной, при этом точка 1 – самый нижний регистрирующий датчик, 2 – верхний;
- 2) линия 1-3 совпадает с лучом отраженной Р волны, соответственно, угол наклона этой линии в общем случае будет равен углу подхода головной

волны к скважине $\text{ctg } i_k = V_2 / V_k(h) - \sin \varphi$, где $V_k(h)$ – кажущаяся скорость головной волны по годографу на глубине h , V_2 – скорость в ПКС, φ – угол падения преломляющей границы. На практике скорость в СМТ меняется незначительно, поэтому в окрестности скважины можно принять угол i постоянным.

- 3) точки 2 и 3 лежат на одной глубине, расстояние между ними равно $X_{23} = H_{12} \text{tg } i_k$.

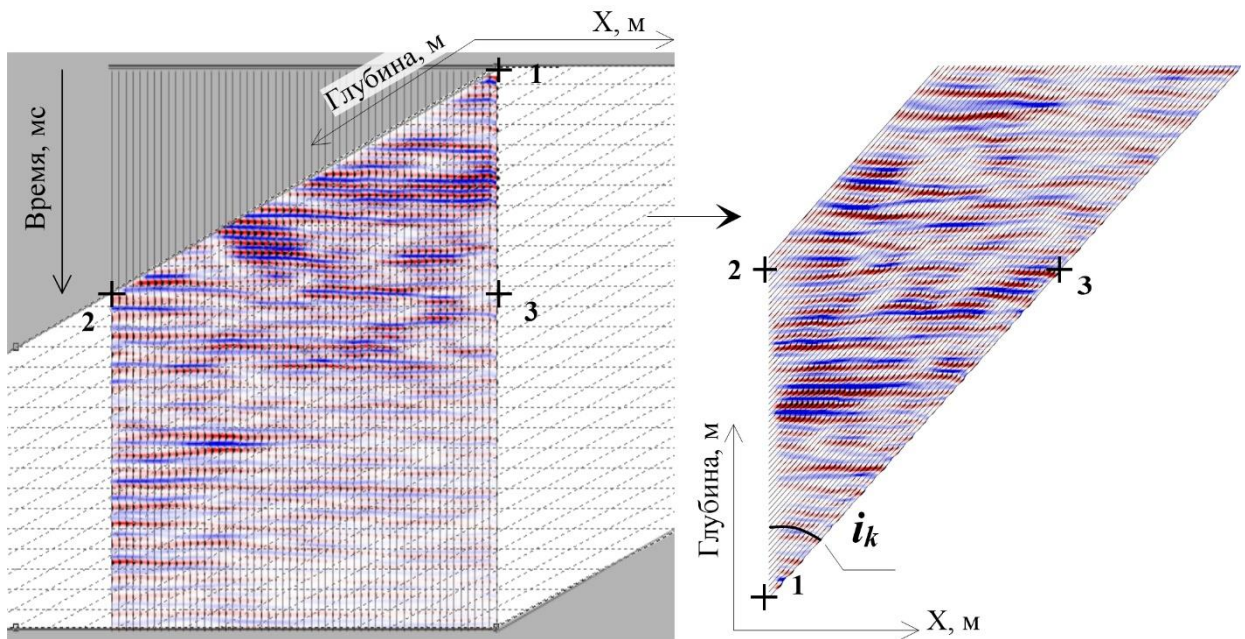


Рисунок 2.39 – Трансформация волнового поля отраженной головной волны из координат t - z в x - z

Как было отмечено ранее, при равенстве шага ПП и ПВ сортировки ОПВ и ОПП равноправны, следовательно, в окрестностях второй скважины можно аналогично построить разрез и разместить его в той же координатной сетке. Предлагаемый подход является сопутствующим при межскважинном просвечивании, и по имеющемуся набору данных рассчитывается скоростное распределение способом межскважинной томографии на проходящих волнах. На рисунке 2.40 приведено совместное построение глубинных сейсмических разрезов по результатам обработки преломленно-отраженных волн и скоростной характеристики по данным межскважинной томографии на проходящих волнах. Кроме того, на рисунке приведены литологическая

колонка и кривые сейсмокаротажа на гидроволнах [Владов, 2002], выполненного тем же комплектом оборудования.

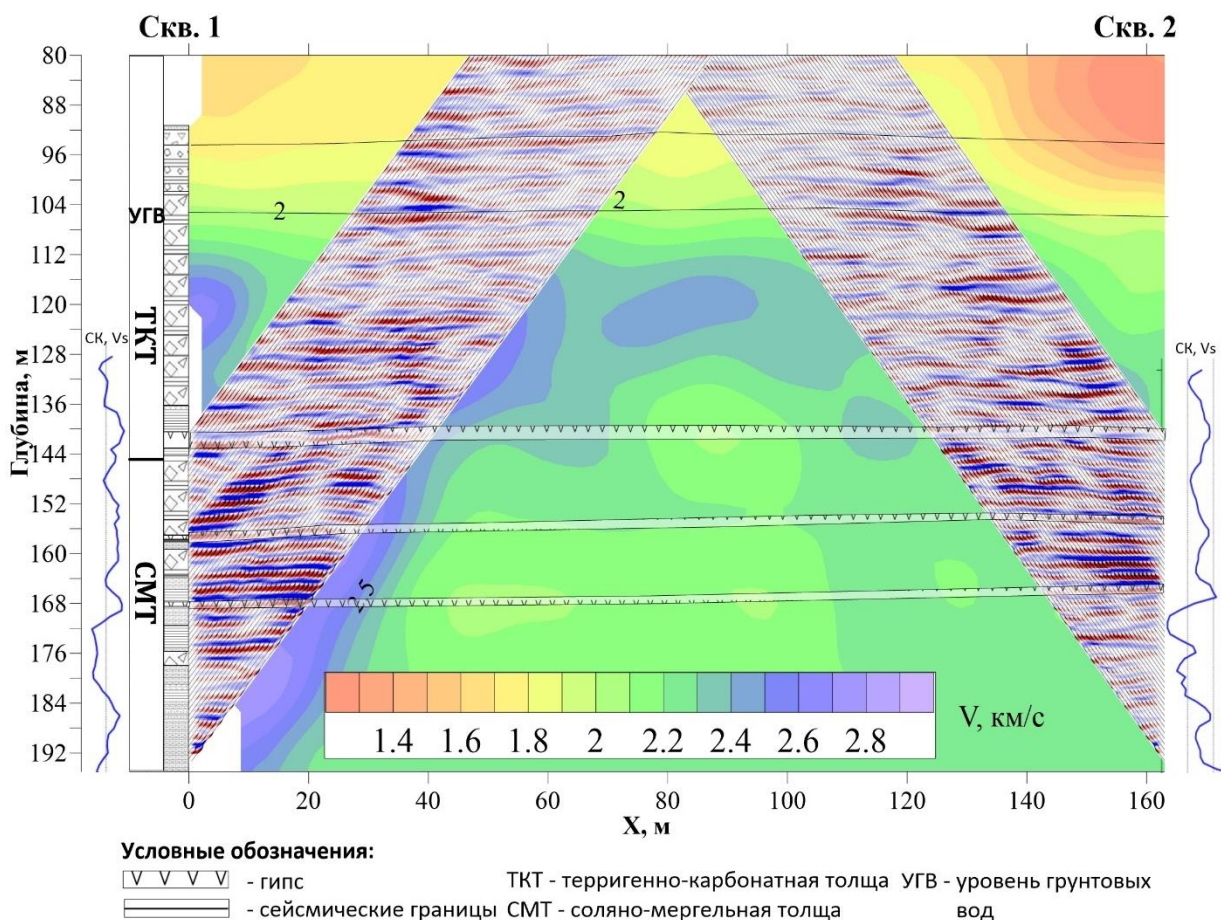


Рисунок 2.40 – Совмещение результатов межскважинной томографии на проходящих волнах и глубинных сейсмических разрезов по результатам обработки головных волн

Наиболее показательным является согласование границы, связанной с уровнем грунтовых вод, полученным в результате прямого измерения в скважинах, которая проявляется как в скоростной характеристике, так и на глубинном сейсмическом разрезе. Наиболее яркие акустические границы совпадают с пропластками гипса в СМТ и подошве ТКТ, которым соответствуют повышенные значения скоростей по данным многоканального сейсмокаротажа. Полученное изображение позволяет более точно расчленять толщу вмещающих пород и проследивать акустические границы в окрестностях участвующих в просвечивании скважин. Длина волны на полученных разрезах составляет 2.5 м, что позволяет вычленять отражения от

прослоев менее 1 м. Горизонтальная разрешающая способность будет зависеть от шага пунктов приема и угла подхода волны $\Delta X = \Delta Z \operatorname{tg} i$, что при $\Delta Z = 1$ м составляет ~ 0.6 м.

Предложенный способ предполагает, что граница терригенных пород и соляной залежи является гладкой и сплошной, то есть геологическая граница совпадает с акустической. В случаях несогласного залегания слоев по кровле ПКС, когда в результате складчатости в нижней толще на этой границе выклиниваются глинистые слои, годограф головной волны будет искажаться. Таким образом, присутствие головной волны в волновом поле межскважинного просвечивания и совпадение теоретического и практически наблюдаемого годографов может служить индикатором отсутствия аномалий геологического строения в кровле ПКС, которая является важным элементом водозащитной толщи.

На основании изучения закономерностей распространения преломленно-отраженных волн разработан способ получения глубинного сейсмического разреза. Специальный граф обработки суммарной сейсмограммы преломленных волн позволяет выделить преломленно-отраженные волны, формирующиеся в горизонтально-слоистой среде при прохождении головных волн снизу-вверх вблизи приемной скважины. Предложен способ миграции таких волн для получения глубинного разреза акустической контрастности. Принцип взаимности позволяет строить такие разрезы как для приемной, так и для излучающей скважины. Полученные данные дополняют результаты томографического расчета скоростной характеристики межскважинного пространства.

2.2.6. Поиск субвертикальных зон трещиноватости с использованием головных волн в методе вертикального сейсмопрофилирования

Методика суммирования головных волн в скважинах применима также и к данным ВСП, позволяя строить суперсейсмограммы головных волн,

прослеживать и получать количественные оценки вертикальных акустически контрастных зон.

2.2.6.1. Анализ волнового поля и характеристик головной волны

В приведенном примере рассматривается обращенное ВСП. В качестве источника применялся электроискровой излучатель в скважине, шаг ПВ – 1 м, между пунктами приема на поверхности – 8 м. Лучевые схемы распространения прямой и головной волны в сортировке ОПП приведены на рисунке 2.41.

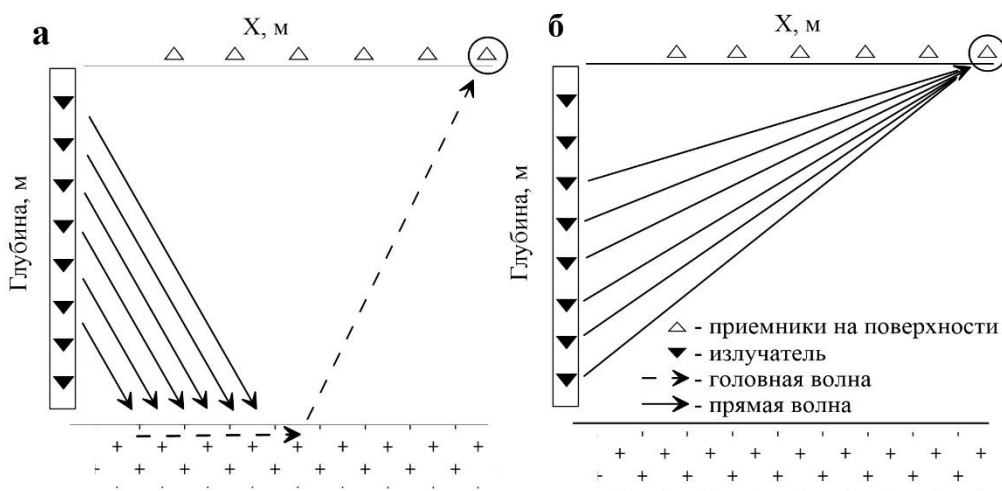


Рисунок 2.41 – Лучевая схема распространения волн для общего ПП: а – головная волна, б – прямая волна

На сейсмограммах общего пункта приема (ОПП) прослеживаются головные волны по интенсивности сравнимые с первыми вступлениями прямой волны (рисунок 2.42). Для головных волн, возбуждаемых в скважине, характерны следующие признаки:

- отрицательный наклон годографа – сигнал от нижних пунктов возбуждения, расположенных ближе к преломляющей границе, регистрируется на более ранних временах;
- форма и кажущаяся скорость по годографу на сейсмограммах ОПП не зависят от положения ПП, меняется только время регистрации;
- плоский фронт головной волны формирует плоский годограф на сейсмограммах ОПП.

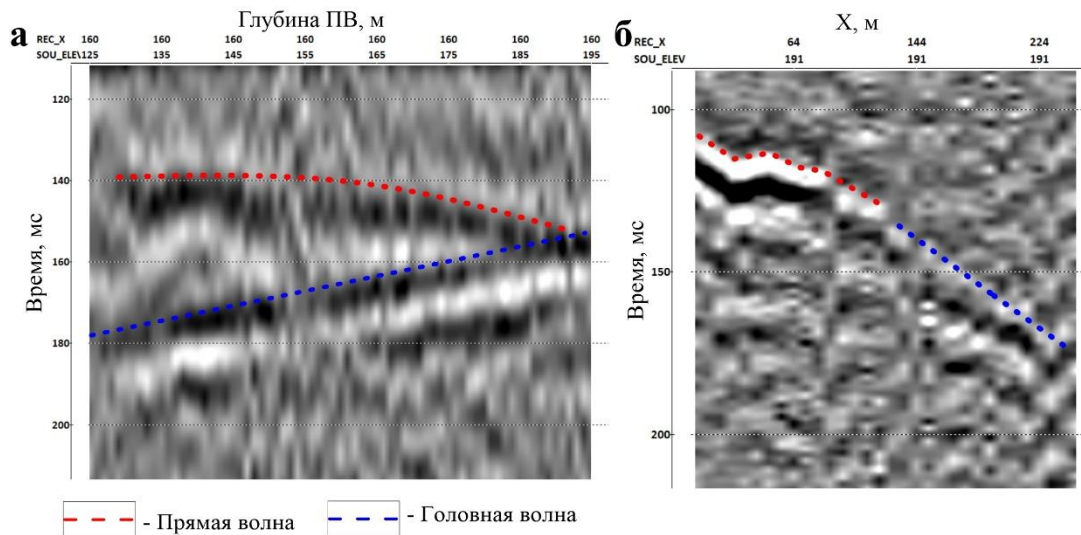


Рисунок 2.42 – а) Сейсмограмма общего пункта приема на поверхности (источники в скважине), б) сейсмограмма общего пункта возбуждения в скважине (приемники на поверхности)

Головные волны, возбуждаемые в скважинах, так же, как и при наземных исследованиях, имеют «мертвую зону» – область в окрестности скважины, где головная волна отсутствует. Зная скоростной разрез, можно найти X_0 – радиус этой зоны, который определяется наклоном хода лучей. Для однородного верхнего слоя с постоянной скоростью V_1 радиус мертвой зоны будет равен

$$X_0 = tg(i_k) l_Z, \quad (2.18)$$

где l_Z – длина проекции луча головной волны «источник – преломляющий горизонт – поверхность» на ось глубин, i_k – угол луча головной волны с вертикалью. В общем случае $i_k = i - \varphi$, где φ – угол падения соляного зеркала в плоскости исследования, а критический угол i определяется из закона Снеллиуса: $V_1 = V_2 \sin i$, и V_2 – граничная скорость в преломляющей толще (см. рисунок 2.25). Для разреза, в котором скорость зависит от глубины как $V_1(h)$ можно записать

$$X_0 = \int tg i_k dh = \int tg \left(\arcsin \left(\frac{V_1(h)}{V_2} \right) - \varphi \right) dh. \quad (2.19)$$

Для плоскостойкой модели, где V_j, H_j – скорость и глубина слоя j , перепишем:

$$X_0 = \sum_j \operatorname{tg} \left(\arcsin \left(\frac{V_j}{V_2} \right) - \varphi \right) H_j, \quad (2.20)$$

причем выполняется $\sum H_j = l_z$. Необходимо учитывать, что слой от ПВ в скважине до преломляющей границы будет пройден два раза, а от ПВ до поверхности – один раз. Если пренебречь углом падения соляного зеркала φ , то $i_k = i$ и выражение 2.20 упрощается:

$$X_0 = \sum_j \left(\frac{V_2^2}{V_j^2} - 1 \right)^{-0.5} H_j \quad (2.21)$$

Ширина мертвой зоны, зависит от глубины пункта возбуждения, соответственно на поверхности можно выделить 3 участка – ближние пункты приема, где головная волна не регистрируется ни от одного источника, дальние пункты приема, где головная волна регистрируется при всех положениях источника, и переходная зона, где происходит частичная регистрация головной волны. Оценка ширины этих зон необходима для корректной идентификации головной волны на сейсмограммах.

2.2.6.2. Получение суперсейсмограммы головной волны

Как показано в пп. 2.2.4, головная волна в окрестностях скважины имеет постоянный ход лучей, определяемый соотношением скоростей в преломляющей и покрывающей толщах, и конфигурацией границы. Для суммирования трасс в пределах одной сейсмограммы общего пункта приема на поверхности необходимо ввести временную поправку за положение пункта возбуждения. Такой подход возможен благодаря постоянству волнового поля головных волн в окрестностях излучающей скважины, что позволяет получить суммарную сейсмотрассу с высоким соотношением сигнал/шум. Данная операция выполняется для всех сейсмограмм ОПП, в результате чего строится сейсмограмма общего пункта возбуждения (ОПВ) по всему профилю приема. База суммирования выбрана в соответствии с критерием максимизации отношения сигнал/шум суммарного волнового поля. В отличие от межскважинного просвечивания, при регистрации головных волн на

поверхности оптимальная база суммирования включает весь интервал возбуждения в скважине.

Для получения временных поправок при наличии второй скважины, расположенной в створе наземного профиля наблюдения, можно воспользоваться первыми вступлениями головной волны, зарегистрированной при межскважинном просвечивании. При межскважинном просвечивании сигнал более высокочастотный и интенсивный, что позволяет снять первые вступления намного точнее, чем при наземной регистрации головной волны (см. Рисунок 2.22, пп. 2.2.1.). В случае отсутствия данных межскважинного просвечивания, вступления головных волн прослеживаются на сейсмограммах ОПП вертикального сейсмопрофилирования (см. рисунок 2.42а). Для улучшения надежности и точности полученных значений времени, выполняется усреднение относительных времен регистрации головной волны, прослеженной на нескольких сейсмограммах.

На рисунке 2.43 приведены сейсмограммы ОПП после ввода поправки за положение ПВ. При суммировании трасс с одноименной координатой ОПП сигнал головной волны будет усилен, а прямая волна подавлена.

Геометрия лучей волны, отраженной от преломляющей границы, при углах близких к критическому сходна с преломленным, поэтому, в результате введения поправки происходит попутное усиление и указанной отраженной волны. В окрестностях критического угла должна наблюдаться инверсия фазы сигнала, которая происходит при преломлении из высокоскоростного слоя в низкоскоростной. Несущая частота исходного сигнала составляет 400-800 Гц, но при выходе волны на поверхность происходит сужение спектра за счет растягивания сигнала в рыхлой приповерхностной толще, в результате чего несущая частота падает до 50-60 Гц, и, фактически, смена полярности будет выглядеть как «ступенька» - небольшое смещение оси годографа.

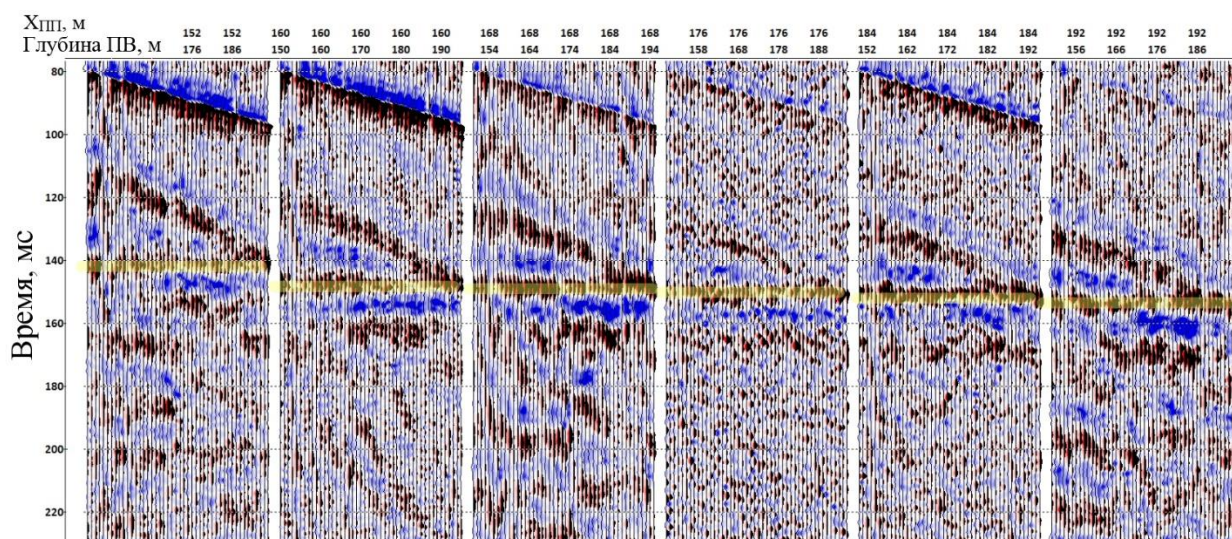


Рисунок 2.43 – Сейсмограммы содержащие головную волну (желтый маркер) после введения поправки за положение ПВ для подготовки к суммированию.

Итогом суммирования является суперсейсмограмма, содержащая головную волну, зарегистрированную на поверхности (рисунок 2.44). Кроме того, на сейсмограмме также присутствуют прямая и отраженная волны, подавленные в результате суммирования лишь частично. На удалениях 96-104 наблюдается предсказанная инверсия фазы – смена отраженной волны на преломленную.

Годограф первых вступлений головной волны начинается с удаления $X_0=104$ м, что совпадает с теоретическим значением, полученным по формуле (2.21). Переходная зона частичной регистрации головных волн расположена между пикетами 104 и 128 м. Начиная с удаления 136 м головная волна прослеживается на всем интервале пунктов возбуждения. На пикетах 152-160 и 208-224 м выделяются участки резкого понижения скоростей.

Поскольку преломляющая граница плоская, лучи головной волны распространяются в массиве параллельно друг другу. При наличии вертикальных и субвертикальных границ будет наблюдаться преломленно-отраженная волна, с кажущейся скоростью противоположенного знака с прямой преломленной (рисунок 2.44). Так, в описываемом примере, от точек на поверхности, характеризующихся понижением кажущейся скорости, берут

начало годографы преломленно-отраженной волны (волны 4,5 на рисунке 2.44).

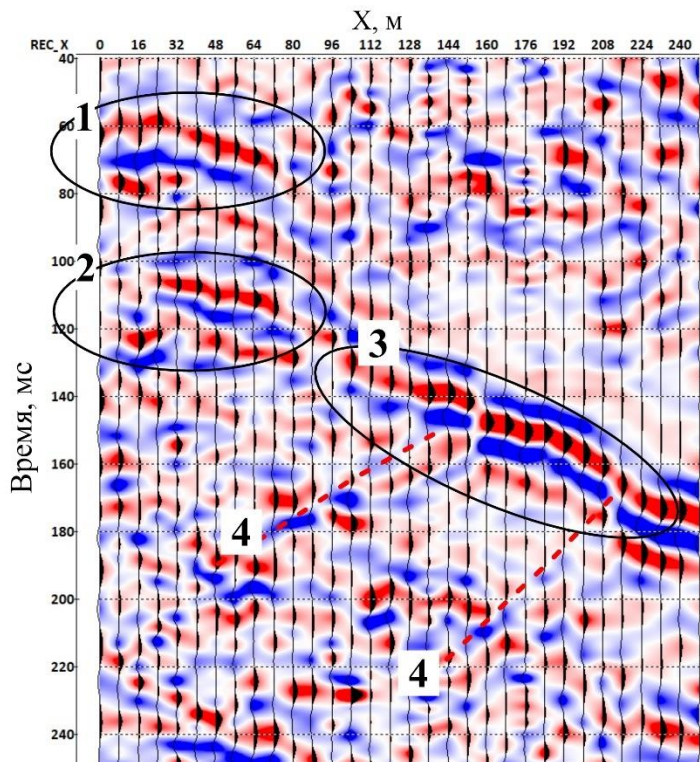


Рисунок 2.44 – Суперсейсмограмма ОПВ в результате суммирования головных волн, 1 - прямая волна, 2 –отражение от кровли солей, 3 – преломленная (головная) волна, 4,5 - преломленно-отраженная волна

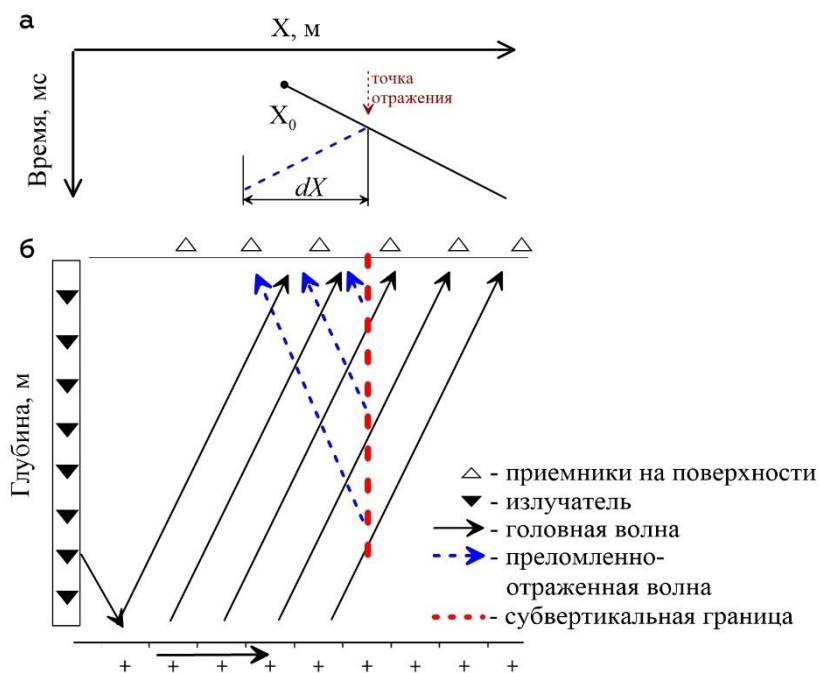


Рисунок 2.45 – Годограф (а) и лучевая схема (б) образования отражений при регистрации головной волны на поверхности.

Угол наклона данной субвертикальной границы можно определить из соотношения кажущихся скоростей прямой и отраженной волны (рисунок 2.46).

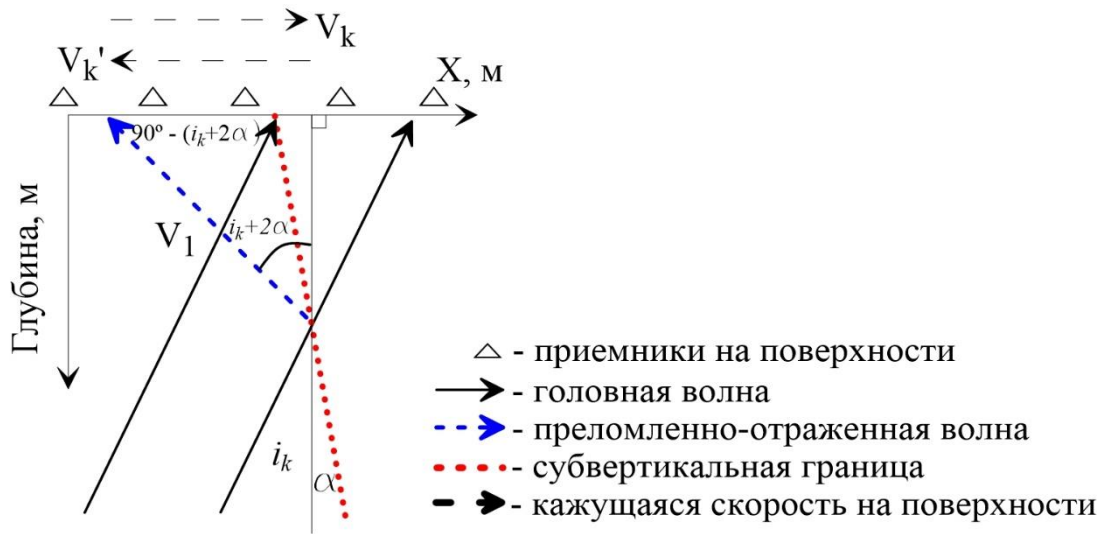


Рисунок 2.46 – Схема отражения от наклонной границы

Кажущаяся скорость прямой головной волны, выходящей на поверхность, по закону Бендорфа равна

$$V_k = \frac{V_1}{\cos(90-i_k)} = \frac{V_1}{\sin(i_k)}. \quad (2.22)$$

При отражении волны от границы с наклоном α (угол α положителен при падении от излучающей скважины), угол выхода будет равен $90 - (i_k + 2\alpha)$, а кажущаяся скорость преломленно-отраженной волны равна

$$V_k' = \frac{V_1}{\sin(i_k+2\alpha)}. \quad (2.23)$$

Исключая скорость среды V_1 из выражений 2.22 и 2.23 получим соотношение

$$V_k' \sin(i_k + 2\alpha) = V_k \sin(i_k), \quad (2.24)$$

откуда α :

$$\alpha = \frac{1}{2} \left(\arcsin \left(\frac{V_k}{V_k'} \sin i_k \right) - i_k \right). \quad (2.25)$$

Угол подхода головной волны i_k при этом оценивается для эффективной скорости в интервале прослеживаемости разрывного нарушения. С учетом наклона преломляющей границы $i_k = \arcsin (V_{\phi}/V_2) - \varphi$.

Диапазон теоретически возможных углов падения ограничен углом выхода головной волны $-i_k < \alpha < 45^\circ - i_k/2$. На практике диапазон будет меньше за счет разрешающей способности сейсмического изображения и возможности выделения на нем годографа преломленно-отраженной волны.

Глубину распространения вертикальной отражающей границы можно определить, ориентируясь на горизонтальную длину ее годографа dX (см. рисунок 2.45), по тому же принципу, по которому выполнялась оценка ширины мертвой зоны (выражения 2.18-2.21):

$$H = dX \operatorname{ctg} (i_k + 2\alpha), \quad (2.26)$$

или для пластовой модели

$$H = dX \sum_j \operatorname{ctg} \left(\arcsin \left(\frac{V_j}{V_2} \right) + \varphi + 2\alpha \right). \quad (2.27)$$

Используя выражения 2.25 и 2.27 применительно к изображению на рисунке 2.44, для выделенных границ получены углы падения и глубина их простираения. Для границы 4 угол $\alpha = 6^\circ$, видимая глубина распространения – 110 м, для границы 5 $\alpha = 22^\circ$, видимая глубина распространения – 32 м. Как нетрудно заметить, увеличение угла отражающей границы весьма существенно влияет на максимальную глубину прослеживания границы.

На рисунке 2.47 результаты поиска субвертикальных границ с использованием преломленно-отраженных волн (красный пунктир) совмещены со скоростной характеристикой, полученной с помощью трехсторонней межскважинной сейсмической томографии. Кровля покровной каменной соли (ПКС), выступающая в качестве преломляющей границы, расположена на глубине 215 м.

Обращает на себя внимание соответствие выделенных субвертикальных границ и латерального изменения скоростей, кроме того, этот участок по данным наземной малоглубинной сейсморазведки отмечен как зона аномалии волнового поля.

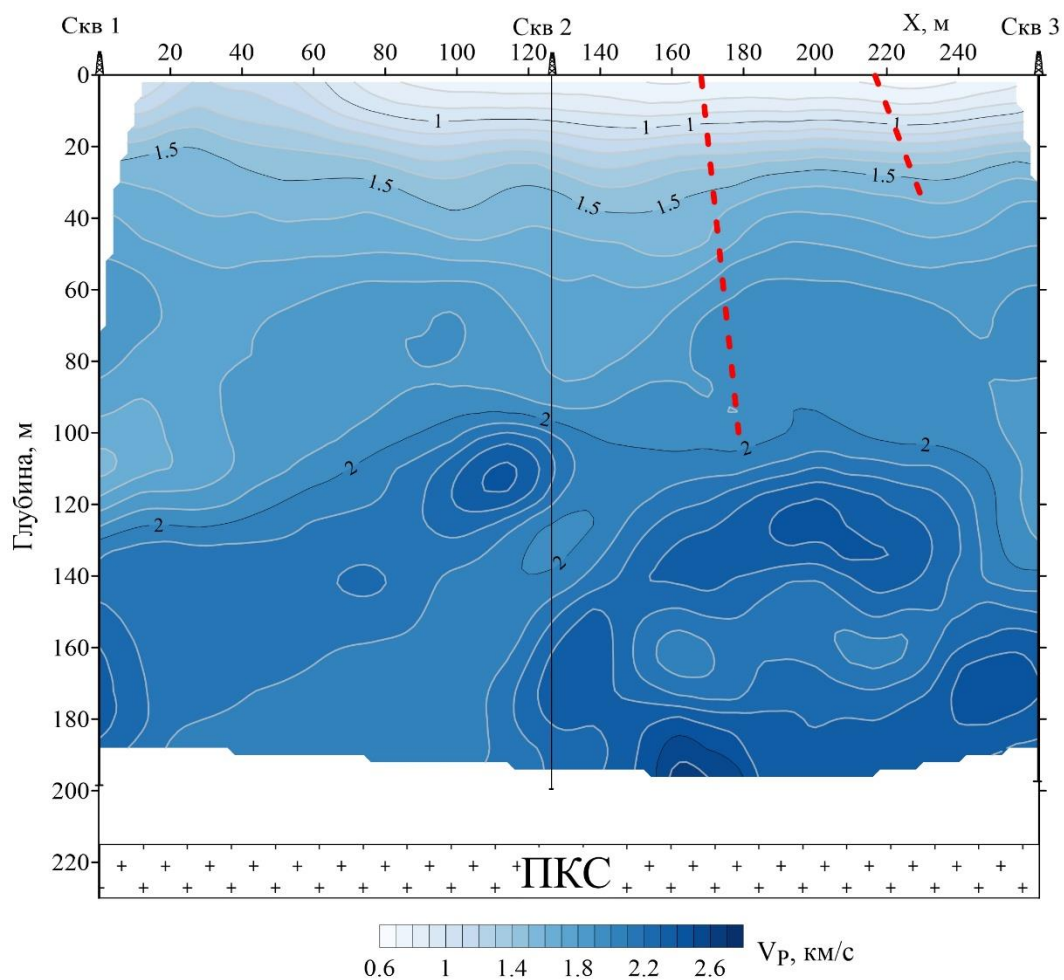


Рисунок 2.47 – Совмещенный разрез скоростной характеристики верхней толщи по данным межскважинной томографии и субвертикальных границ, выделенных с помощью преломленно-отраженных волн.

На основании изучения закономерностей распространения головных волн, регистрируемых при проведении вертикального сейсмопрофилирования, разработана методика поиска и локализации субвертикальных зон с контрастными акустическими свойствами (трещин, разломов, границ блоков). В результате суммирования головных волн строится сейсмическое изображение, по которому определяется положение вертикальной границы, угол падения и глубина распространения. Совмещение предложенной методики с результатами сейсмической томографии на проходящих волнах позволяет расширить интерпретационные возможности скважинных сейсмических методов при изучении подработанного массива. В качестве недостатков методики необходимо отметить ее высокую

чувствительность к наклону субвертикальной границы: на практике количественные оценки глубины ее распространения возможны при углах отклонения от вертикали не более 20° .

2.2.7. Моделирование объема Френеля головных волн

Для оценки пространственных возможностей головной волны и разрешающей способности методик получения глубинных сейсмических разрезов выполнено моделирование объема Френеля для различных вариантов размещения пары источник-приемник. Результаты для межскважинного просвечивания приведены на рисунке 2.48. Для типичного значения несущей частоты 500 Гц время $T/2$ соответствует 1 мс. По изображениям можно оценить поперечные размеры объема Френеля в плоскости x - z .

При расстоянии между скважинами 150 м и частоте 500 Гц мощность высокоскоростного слоя, в котором происходит распространение волны, составляет 10-15 м. Полученный результат важен для понимания закономерностей распространения головных волн и особенностей их пространственного распределения при изучении водозащитной толщи, частью которой является высокоскоростная соляная толща.

На следующем этапе выполнено моделирование распределений в плоскости r - u , где r – лучевая координата. Для упрощения модели, источник и приемник расположены на одной глубине. Результаты приведены на рисунке 2.49. Распределения представляют собой поле времен на ломаной плоскости, определяемой положением луча r . Положение плоскости r - u в трехмерном пространстве показано на рисунке 2.50. На этом же рисунке представлена проекция плоскости r - u на плоскость x - u на глубине преломляющей границы.

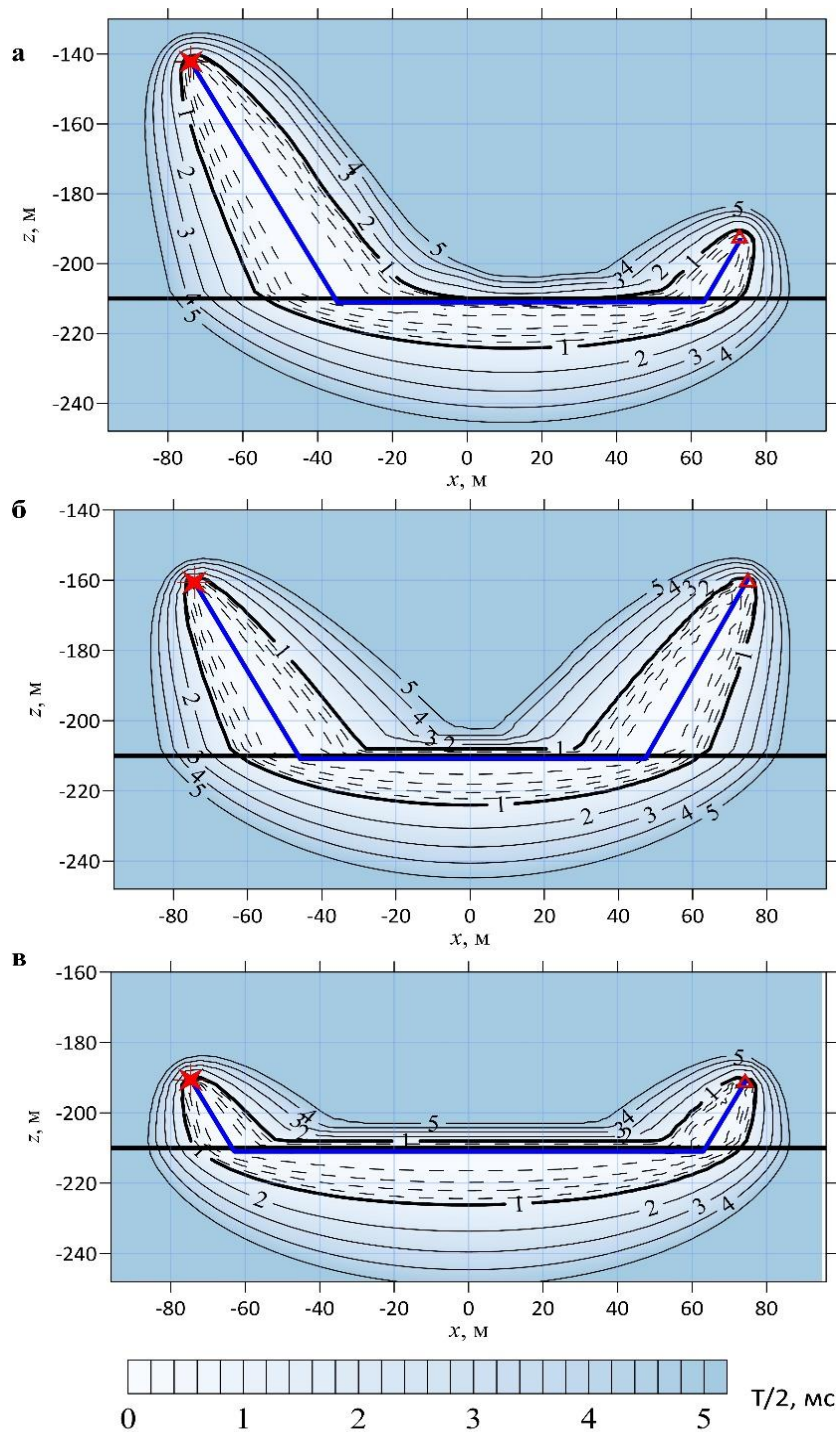


Рисунок 2.48 – Сечение объема Френеля в плоскости x - z при различных значениях $T/2$ и фиксированных глубинах источника и приемника. Синей линией обозначено положение идеального луча. $T/2 = 1$ мс соответствует частоте сигнала 500 Гц. а – источник 140 м, приемник 190 м; б – источник и приемник 160 м; в – источник и приемник 190 м.

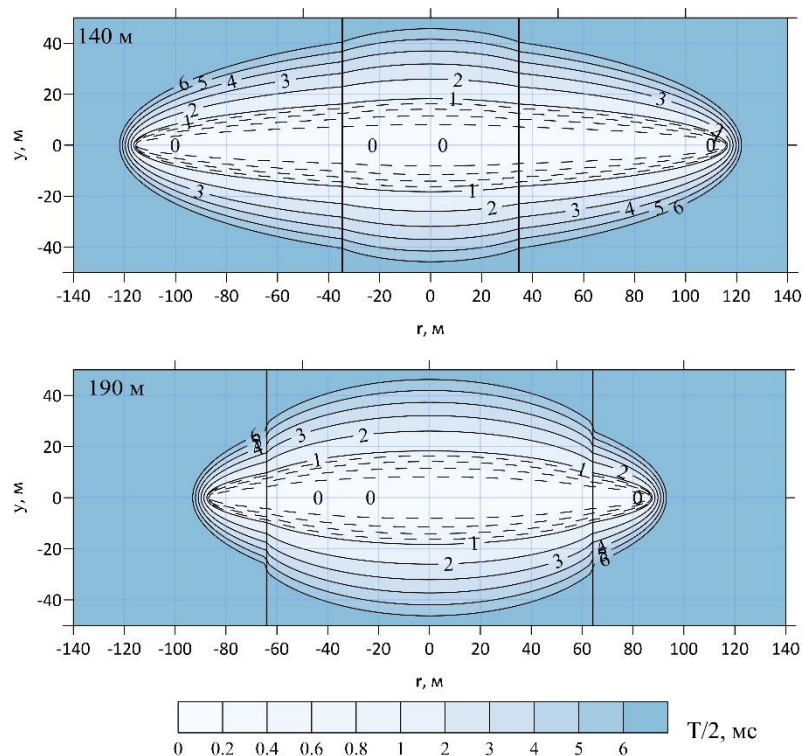


Рисунок 2.49 – Сечение объема Френеля в плоскости r - y . Глубина источника и приемника 140 м (а), 190 м (б).

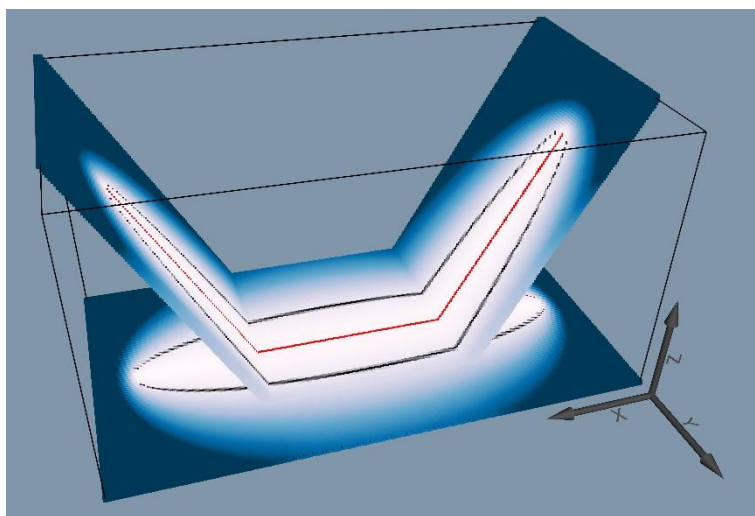


Рисунок 2.50 – Объемное представление плоскости r - y и ее проекции на плоскость x - y

На рисунке 2.51 приведено сравнение двух проекций, полученных из распределений для разных положений пунктов возбуждения и приема, а также их разность. Для частот выше 100 Гц относительная разность составляет не более 4%. Наибольшее отличие наблюдается вблизи линии преломления, и

предположительно является следствием ошибок, вносимых 2D моделированием.

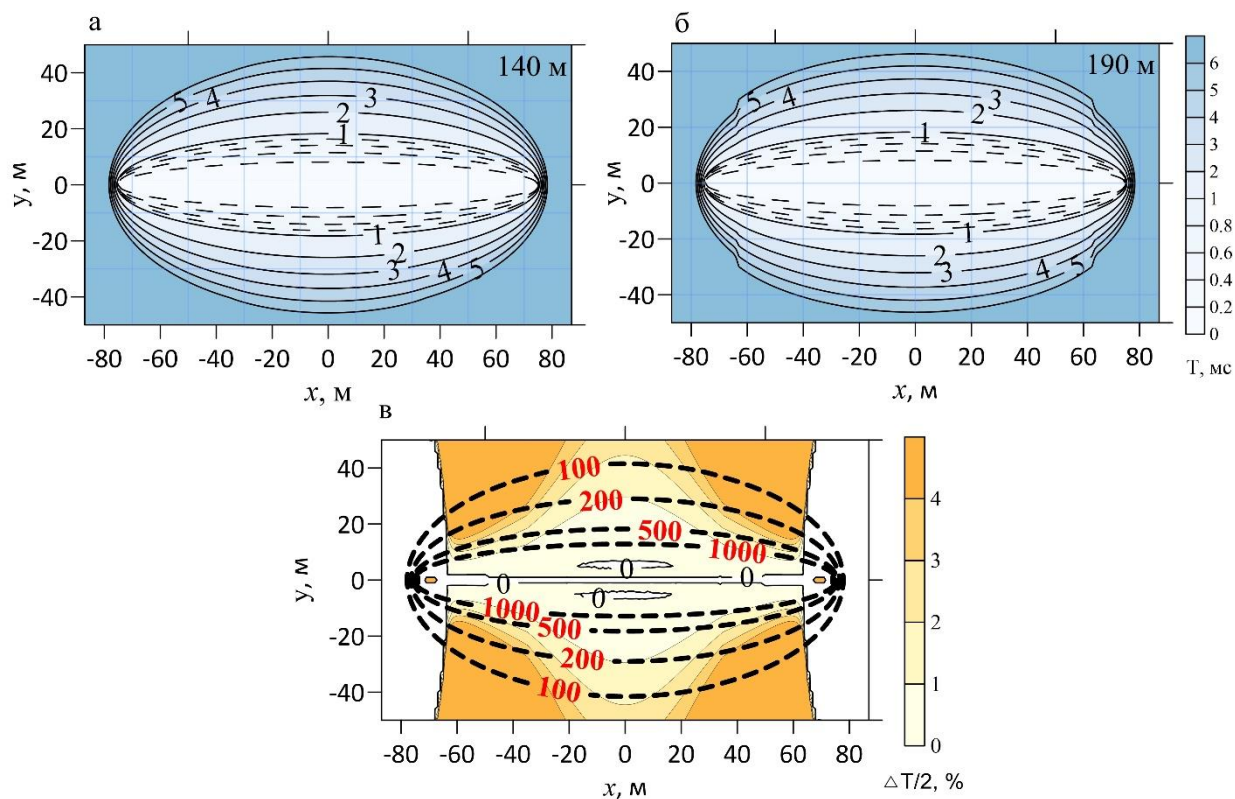


Рисунок 2.51 – Сравнение проекций объема Френеля на плоскость x - y при различных положениях источника и приемника в скважине. (а) – глубина ПВ и ПП 140 м; (б) – 190 м; (в) – их разность в процентах, совмещенная с изолиниями частоты сигнала в Гц.

Для подтверждения полученных результатов проведено трехмерное моделирование. На рисунке 2.52а совмещены две изоповерхности, ограничивающие объем Френеля при значении полупериода $T/2 = 1$ мс, (частота сигнала 500 Гц) и положениях ПВ и ПП на глубине 140 и 190 м. Также приведено вертикальное сечение рассчитанного объема в плоскости y - z при $x=0$ (рисунок 2.52б). Удаление ПВ и ПП от преломляющей границы, расположенной на отметке $z = -210$ м, приводит к сжатию объема Френеля по оси z , при сохранении размеров по оси y . Возможно здесь стоит оценить плотность энергии волны, проходящую через данное сечение, которая при удалении линии наблюдения от границы с одной стороны уменьшается за счет

увеличения расстояния, с другой увеличивается за счет уменьшения площади сечения.

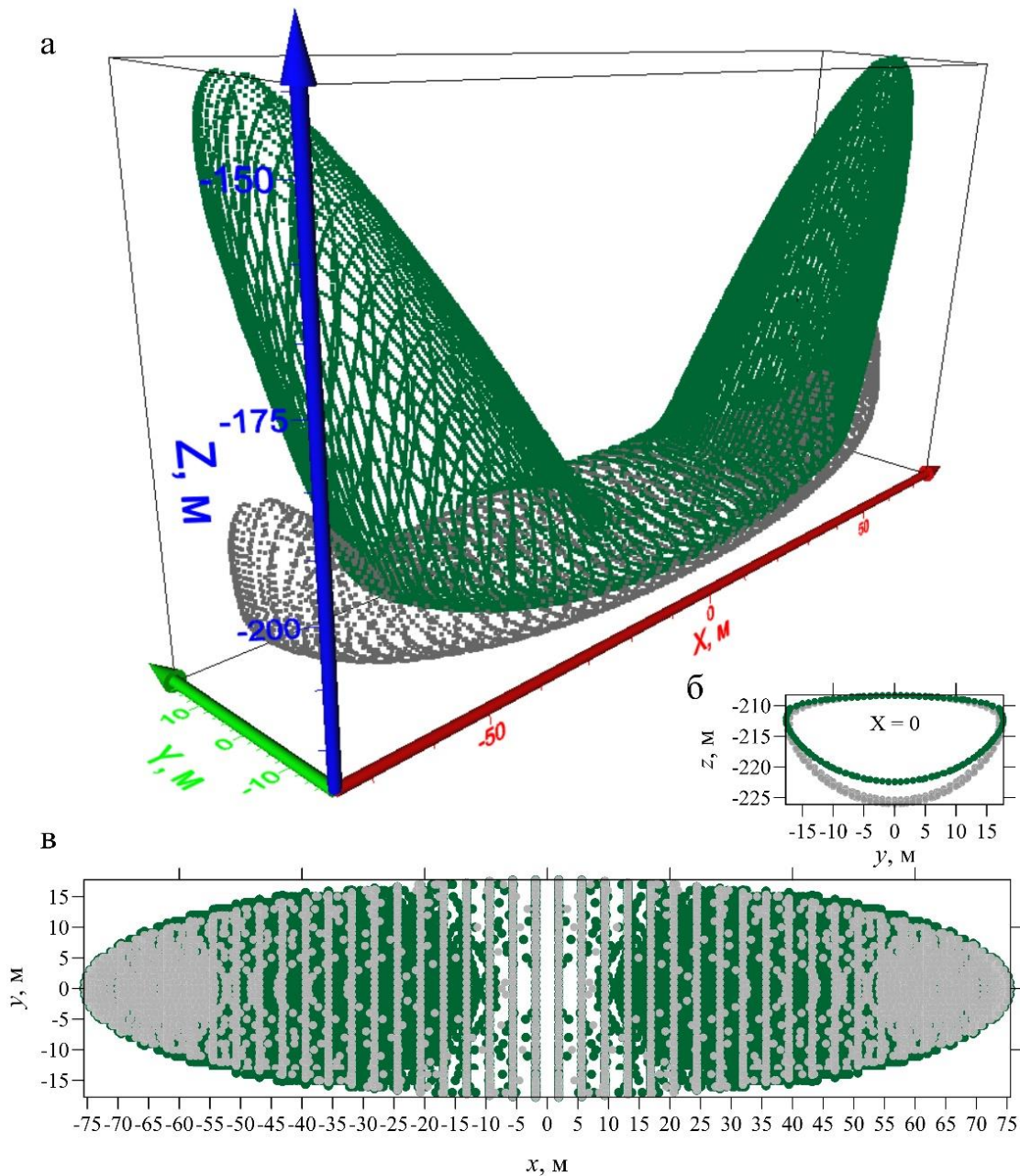


Рисунок 2.52 – Результаты 3D моделирования объема Френеля головных волн. (а) – объемное представление изоповерхностей ограничивающей объем Френеля для частоты $f=500$ Гц при положениях источника и приемника 140 и 190 м; (б) – сечение поверхностей плоскостью $x=0$; (в) – проекция изоповерхностей на плоскость $x-y$.

Проекция изоповерхностей на плоскость $x-y$ (рисунок 2.52в) дает наглядное представление о размерах поперечного сечения при разных

100

глубинах ПВ и ПП. В центральной части наблюдается практически полное совпадение распределений; в краевой зоне ($|x|=35-65$ м) присутствует незначительное расширение объема при удалении линии ПВ-ПП от границы, что подтверждает результаты 2D моделирования.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что размер объема Френеля по оси y для головных волн совпадает с размерами прямой волны для предельного случая, когда ПВ и ПП расположены на кровле преломляющей толщи, и оцениваемой по формулам (1.2) и (1.3).

Размеры первой зоны Френеля по оси z составляют $1/3-1/2$ от размеров по оси y . Сжатие объема Френеля головных волн в высокоскоростной преломляющей толще усиливается при удалении источника и приемника от этой границы.

Совпадение проекций объема Френеля головных волн при различных положениях источника и приемника на оси z является следствием закона Снеллиуса и неизменности параметра луча для объема Френеля.

В таблице 2.3 и на рисунке 2.53 приведены результаты расчетов объема Френеля для преломленных волн в соляной и надсоляной толще для типичных сейсмогеологических условий ВКМС.

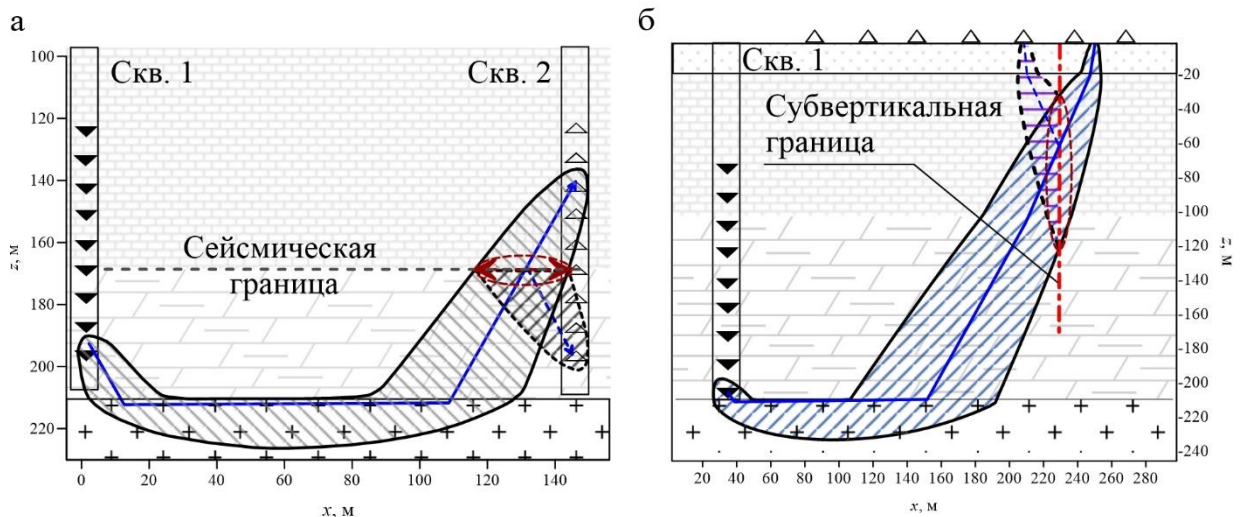


Рисунок 2.53 – Схема определения размеров отражающих площадок. (а) – преломленно-отраженная волна при МСП, (б) – головная волна в методе ВСП

Таблица 2.3 - Параметры глубинных сейсмических изображений, полученных при изучении головных волн способом моделирования объема Френеля

Методика	Частота сигнала, Гц	Длина волны, м	Разрешающая способность вдоль отражающей границы, м	Размеры разреза по координате y
Глубинный сейсмический разрез, получаемый с помощью преломленно-отраженных волн (рисунок 2.53а)	500	4	6-12	10-25
Поиск субвертикальных трещиноватых зон с помощью головных волн в методе ВСП (рисунок 2.53б)	80	20	30-50	25-40

Помимо полученных численных значений разрешающей способности методических решений, проведенные исследования объема Френеля головных волн позволяют сформулировать два вывода. Во-первых, горизонтальная проекция объема Френеля головной волны может быть найдена путем проекции точек возбуждения и приема на плоскость высокоскоростного преломляющего слоя. Во-вторых, если при межскважинном просвечивании скважины перпендикулярны высокоскоростному преломляющему слою, то проекция объема Френеля головных волн на этот слой практически не зависит от положения источника и приемника в скважине.

2.3. Методические решения с применением единственной скважины

Размещение источника и приемника упругих волн в одной скважине – хорошо известный принцип, являющийся основой акустического каротажа. Существуют многоэлементные каротажные зонды, основными задачами которых являются оценка физико-механических свойств вмещающих пород, акустической жесткости, состояния скважины и расчленение разреза [Ахметсафин, 2009]. Такие зонды, как правило, работают в акустическом и ультразвуковом диапазоне и диапазон их исследований ограничен десятками сантиметров вокруг скважины.

Подобная компоновка сейсмической аппаратуры на большом масштабном уровне (максимальный вынос до 30 м) и частотном диапазоне 100-4000 Гц может найти применение для решения задач иного плана, связанных обнаружением контрастных акустических границ, преимущественно вертикально ориентированных, расположенных вблизи скважины.

2.3.1. Скважинное профилирование ОГТ

Идея выполнения стандартной методики ОГТ с использованием источников и приемников, расположенных в одной скважине, на первый взгляд не кажется вполне перспективной, поскольку стандартные скважинные источники имеют равномерную диаграмму направленности по азимуту. Возникает проблема определения направления, с которого пришел зарегистрированный отраженный сигнал. Априорная информация о наличии резких акустических границ может устранить азимутальную неопределенность и позволит картировать такие границы.

В литературе есть несколько примеров реализации данного подхода. В частности, впервые проводить скважинные исследования с совмещением источников и приемников в одной скважине с целью картирования вертикальных нарушений предложено в работе [Mayer, 1997] для изучения резервуара сланцевой нефти. Необходимо отметить, что в указанной работе выполнялись комплексные исследования межскважинного просвечивания и скважинного профилирования ОГТ. Другой пример относится к картированию границ кимберлитовой трубки для уточнения запасов [Cosma, 2007].

Данная методика может быть использована при разработке месторождений водорастворимых полезных ископаемых в процессе контроля формирования ледопородного ограждения (ЛПО) при строительстве шахтных стволов (рисунок 2.54). Наличие высококонтрастной акустической границы,

образующейся при фазовом переходе в процессе заморозки грунта, однозначно определяет направление прихода отраженных волн.

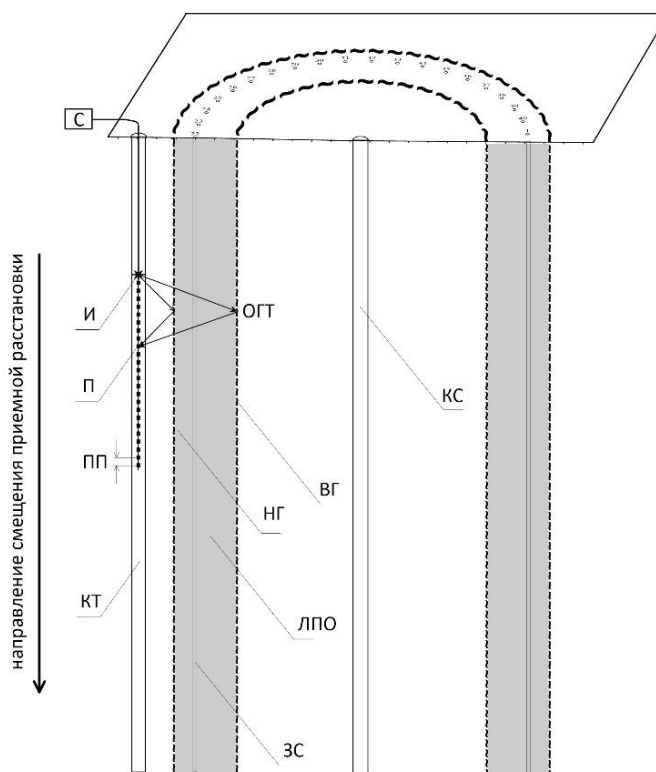


Рисунок 2.54 – Схема наблюдений скважинной методики ОГТ. ЛПО – ледопородное ограждение, КТ – контрольно-термометрическая скважина, КС – контрольно-стволовая скважина, ЗС – замораживающие скважины, НГ – наружная граница ЛПО, ВГ – внутренняя граница ЛПО, С – сейсмостанция, И – источник колебаний (спаркер), П – пьезоэлектрические сейсмоприемники, ПП – шаг пунктов приема и возбуждения.

В большинстве геологических условий при реализации методики ОГТ в контрольной скважине будут зафиксированы контрастные отражения, ассоциируемые с вертикальными границами ЛПО (рисунок 2.55). Определение границ ЛПО необходимо для контроля его возведения, определения толщины и соблюдения устойчивости при проходке шахтных стволов. Наиболее полное представление о состоянии ЛПО дает выполнение скважинного профилирования ОГТ в комплексе скважинных методов, включающем также межскважинное просвечивание и вертикальное сейсмопрофилирование.

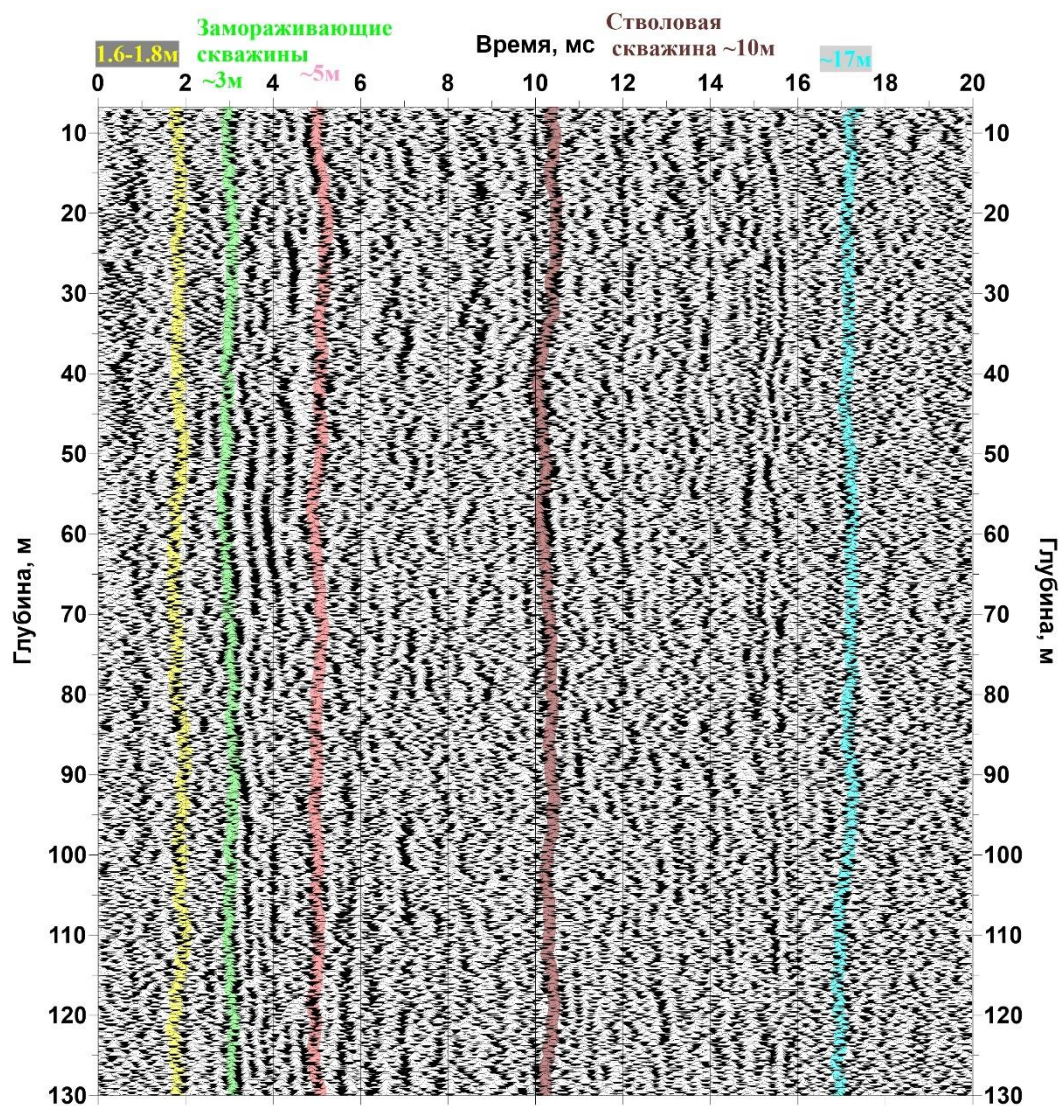


Рисунок 2.55 – Конечный временной разрез по результатам обработки скважинного профилирования ОГТ при проходке шахтных стволов с замораживанием вмещающих пород

2.3.2. Сейсмический картаж при выполнении скважинного профилирования ОГТ

При использовании электроискрового скважинного источника и датчиков давления, на сейсмограммах регистрируются прямая продольная волна (P), распространяющаяся по вмещающему массиву горных пород, и низкочастотная волна, распространяющаяся по контакту скважины и вмещающего массива (рисунок 2.56). Поперечные волны в массиве регистрируются как дважды обменные PSP, и соответственно, имеют низкую

амплитуду. Этот факт, вместе с достаточно большим шагом пунктов приема и возбуждения, в большинстве случаев не позволяет уверенно их коррелировать.

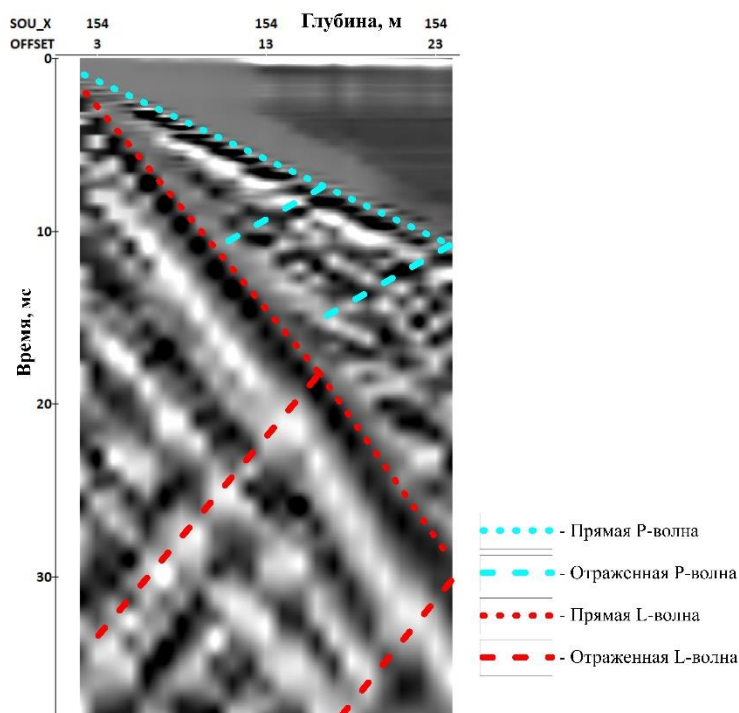


Рисунок 2.56 – Сейсмограмма многоканального каротажа, содержащая прямые и отраженные продольные и гидроволны

Как продольные, так и гидроволны, при падении на жесткие акустические границы будут формировать отражения, которые можно использовать для дополнительного изучения физических свойств околоскважинного пространства.

2.3.2.1. Получение скоростной характеристики разреза

При возбуждении упругих волн в малоглубинных водонаполненных скважинах электроискровым источником возникает интенсивная низкочастотная волна, распространяющаяся вдоль оси скважины по контакту скважины и вмещающих горных пород. Гальперин в монографии [Гальперин, 1982] предложил называть эту волну гидроволной. В различных исследованиях в зависимости от частотного диапазона и наличия обсадки данную волну идентифицируют как гидроволну [Владов, 2003], волну Стоунли [Козьяр, 2013], волну Шольта [Fang, 2018] и волну Лэмба [Бураго, 1980] в англоязычной литературе она фигурирует как «tube waves» [Wehner,

2021]. В настоящей работе данный класс волн, в соответствии с частотным составом, не превышающим 150-300 Гц и скоростями ниже скоростей поперечных волн в массиве, рассматривается как волна в трубе с бесконечно толстыми стенками [Lamb, 1898] и в соответствии с устоявшейся терминологией, используется термин «гидроволна» и обозначение L-волны.

Для таких волн, при длине волны большей, чем $5d$ (d – диаметр скважины) [Владов, 2003], скорость определяется модулем сдвига вмещающих пород μ и параметрами жидкости: скоростью волны давления V_0 и плотностью ρ_0 [Lamb, 1898]:

$$V_L = V_0 \sqrt{\frac{\mu}{\mu + \rho_0 V_0^2}}. \quad (2.28)$$

Как следует из формулы (2.28), гидроволна содержат информацию о модуле сдвига среды [Владов, 2002; Ошкин, 2015] и позволяют выполнять расчленение разреза вдоль скважины.

В работе [Henriet, 1983] показано, что для скважины обсаженной ПВХ пластиком, в случае обводненного разреза (присутствие жидкости в затрубном пространстве), влияние обсадной трубы незначительно, что позволяет использовать гидроволну для анализа характеристик вмещающего разреза.

При условии $f \rightarrow 0$ скорости гидроволны и поперечных волн во вмещающем массиве связаны следующим соотношением [Уайт, 1986]:

$$V_s = \left(\frac{\rho_c}{\rho_0} \left(\frac{1}{V_L^2} - \frac{1}{V_0^2} \right) \right)^{-0.5}, \quad (2.29)$$

где ρ_c – плотность вмещающей среды, что осложняет переход от значений скорости гидроволны к V_s .

С увеличением расстояния между источником и приемником, увеличивается проникновение гидроволны вглубь массива горных пород. Объем захватываемого пространства определяется глубиной эффективного проникновения гидроволны, которое составляет половину длины волны ($\lambda/2$). В свою очередь, для оценки глубины проникновения объемных P и S волн

необходимо использовать радиус первой зоны Френеля: $R = \sqrt{l\lambda + \lambda^2/4}$, где l – расстояние, пройденное волной от источника до приемника. Вертикальная разрешающая способность для прямой волны обоих типов ограничивается шагом между пунктами приема $X_{ПП}$.

Изучение скоростного разреза околоскважинного пространства по данным акустического каротажа, выполняемого с помощью многоэлементного зонда, весьма обширно представлено в литературе [Горгун, 2011; Пименова, 2015; Ахметсафин, 2017]. В рамках выполнения скважинного профилирования ОГТ возможна новая в методическом отношении реализация процедуры скоростного анализа.

Применение многоканальной установки позволяет: во-первых, уменьшить погрешность определения скорости за счет статистического эффекта; во-вторых, выбрать те участки записи, где интерференция разных типов волн минимальна. Скорости определяются по разности времен прихода на два соседних датчика (рисунок 2.57). При использовании 24-х канальной гидрофонной косы, за два прохода на каждом интервале скорость определяется 48 раз. На ближних удалениях интерференция волновой картины наиболее сильно осложняет выделение первых вступлений, поэтому часть каналов с удалениями меньше 5 м не используется.

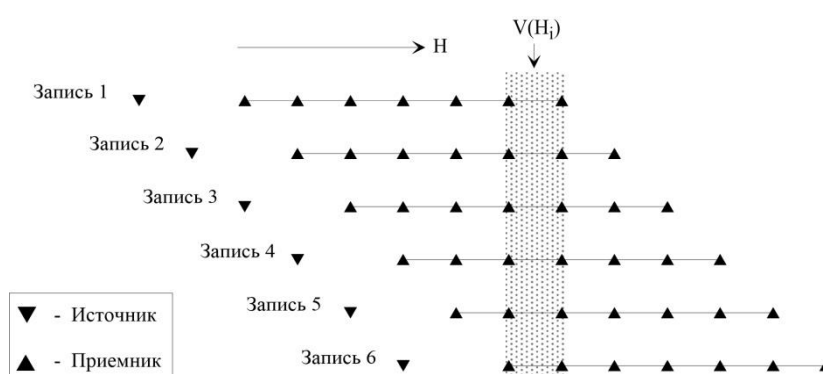


Рисунок 2.57 – Многократное определение скорости при многоканальной системе наблюдений.

При многократном измерении одной величины погрешность результата измерений с надежностью 0.95 составляет [Алексеев, 1972]:

$$\varepsilon = \pm \frac{t_{ан} s_n}{\sqrt{n}},$$

где s_n – среднеквадратическое отклонение измеренных величин, а $t_{ан}$ – табличное значение, равное 2,05 при $n=40$ и 2,09 при $n=20$. Таким образом, погрешность измерений равна $0,32s_n$ при $n=40$ (два прохода – правый и левый фланги) и $0,47s_n$ при $n = 20$ (один проход). На рисунке 2.58 приведены графики рассчитанной относительной погрешности скоростей продольных и гидроволн при измерении за один проход.

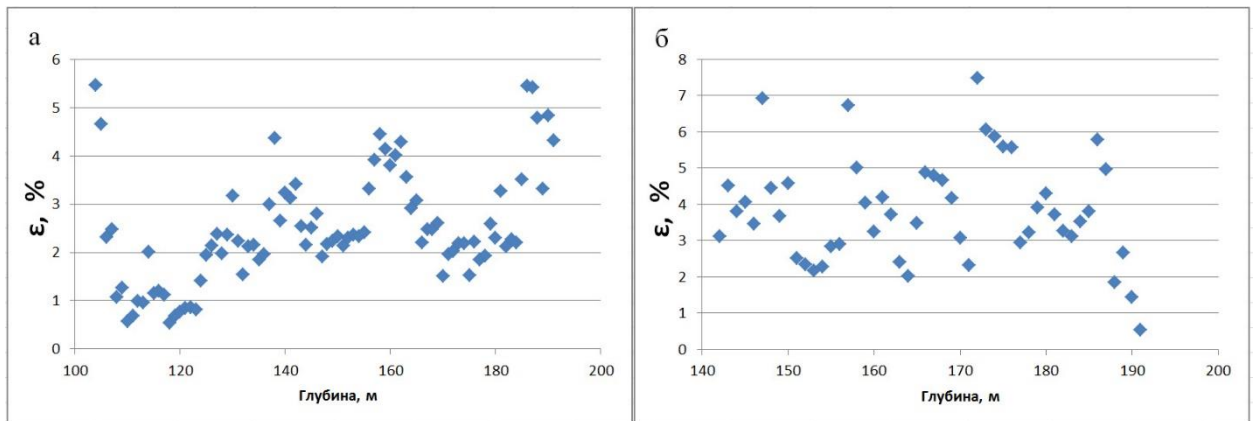


Рисунок 2.58 – Значения относительной погрешности измерения скоростей продольной волны (а) и гидроволны (б)

2.3.2.2. Получение сейсмотрассы отраженных волн

Для геологической привязки получаемых значений скоростей распространения изучаемых волн необходимо получение трассы отраженных волн, которая является аналогом трассы коридорного суммирования в методике ВСП-ОГТ.

Общим принципом получения трассы отраженных волн как для продольных, так и для гидроволн является выделение поля отраженных волн и суммирование полезного сигнала за счет многоканальности и многократной записи. Кратность суммирования составляет до 120 для продольных волн и более 400 для гидроволны.

Для выделения поля продольных отраженных волн больше всего подходит участок записи на дальних каналах, где отраженная продольная волна регистрируется раньше прямой гидроволны (рисунок 2.59а).

Прямая продольная и гидроволна подавляются с помощью f - k -фильтрации, кроме того, вводится кинематическая поправка, позволяющая расположить отражения от одного слоя на одном времени (рисунок 2.59б). Данная процедура позволяет просуммировать отражения в пределах одной сейсмограммы. После чего строится разрез вдоль ствола скважины, первоначально без учета перемещения зонда. Скорости определяются по первым вступлениям и позволяют внести поправку за положение зонда.

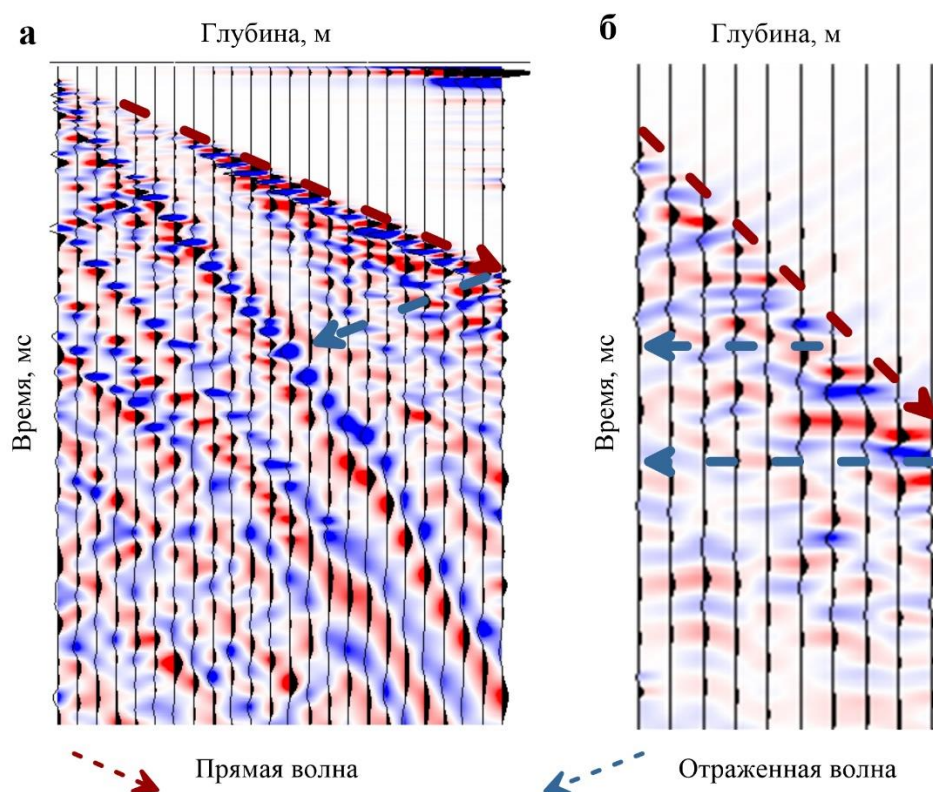


Рисунок 2.59 – Подготовка к суммированию в пределах одной записи: (а) исходная сейсмограмма, (б) после f - k фильтрации и введения кинематики.

В итоге строится разрез отраженных волн вдоль скважины с учетом смещения зонда (рисунок 2.60а). По этому разрезу можно выполнить коридорное суммирование и получить трассу отраженной волны (рисунок 2.60б). Глубинная привязка осуществляется по первым вступлениям прямой волны.

Аналогично, трассу сейсмического отклика можно получить и для гидроволны. Отличия будут заключаться: 1) в природе волн, реагирующих на изменение модуля сдвига; 2) в более низкой частоте сканирующего сигнала,

3) в значениях кинематических поправок, вычисляемых на основании скорости гидроволны.

Трасса отраженных волн является результатом свертки импульса падающей волны с разрезом акустического импеданса вдоль скважины. Таким образом, ее можно использовать для сейсмогеологического расчленения разреза. При наличии литологической колонки по скважине, отражения привязываются к геологическому разрезу. Разрешающая способность отраженной волны зависит не от шага между приемниками, а только от длины волны и составляет $1/4 \lambda - 1/8 \lambda$.

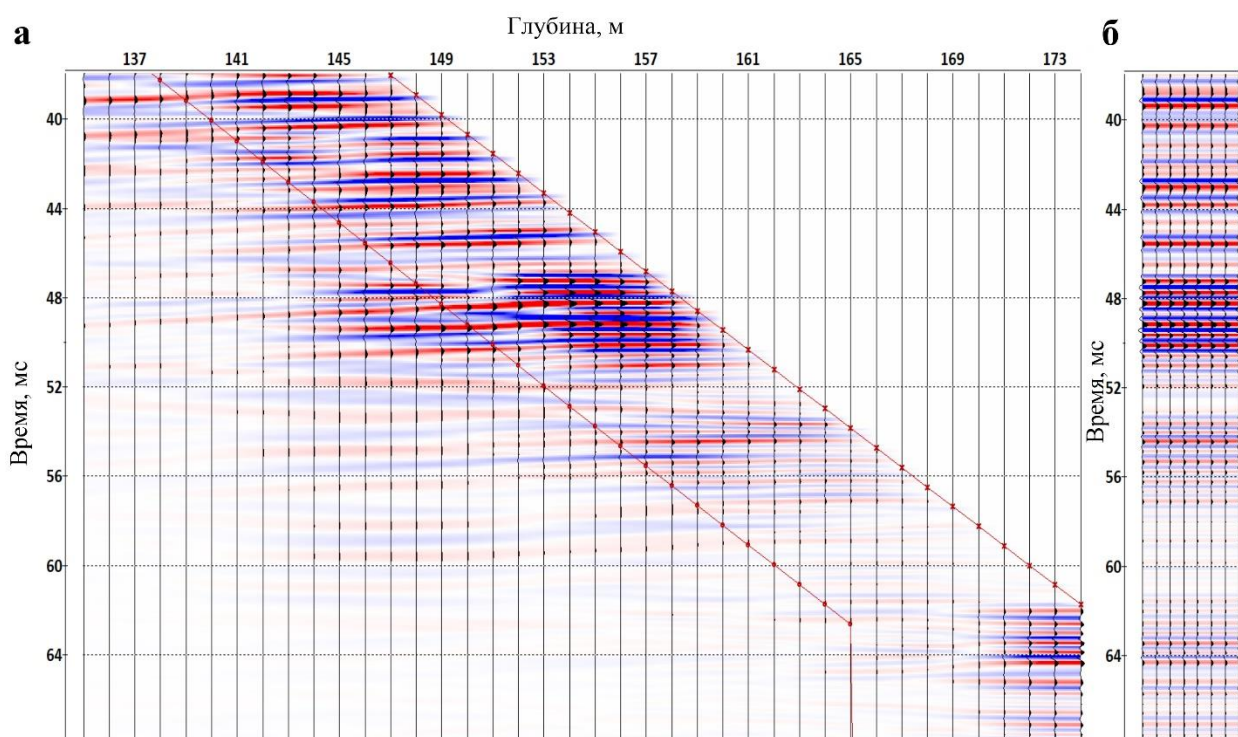


Рисунок 2.60 – Получение трассы отраженной волны: (а) - разрез продольных отраженных волн с учетом смещения зонда и границы коридорного суммирования; (б) - результирующая трасса отраженной волны

Скважинный электроискровой источник генерирует начальный сигнал с верхней частотой спектра 5-7 кГц. В обводненном терригенном разрезе частота регистрируемой прямой продольной волны составляет 2500-4000 Гц, отраженной – 1000-2500 Гц. Спектр частот регистрируемой гидроволны относительно стабилен, как для прямых, так и для отраженных волн, и составляет 120-180 Гц. Численные характеристики параметров

регистрируемых волн приведены в сводной таблице 2.4. Разрешающая способность отраженной волны продольных волн составляет 0.25-0.5 м, а гидроволны – 1-1.5 м.

Если рассматривать многоканальный сейсмический каротаж в качестве альтернативы традиционному акустическому каротажу, то необходимо отметить, что линейные размеры существенно превышают подавляющее большинство зондов, выпускаемых серийно. Это приводит к увеличению объема захватываемого пространства и позволяет практически полностью избежать влияния скважины на гидроволну, как для прямого измерения скорости, так и при получении трасс отраженных волн. При этом разрешающая способность измерения скорости равна шагу системы расстановки, которая, как правило, при подобных исследованиях равна 1 м, реже 0.5 м и не может конкурировать с традиционными зондами акустического каротажа, шаг съемки которых существенно меньше.

Таблица 2.4. – Численные характеристики составляющих волнового поля

	Р-волна прямая	Р-волна отраженная	Гидроволна прямая	Гидроволна отраженная
Скорость, м/с	1300-4000	1300-4000	400-1400	400-1400
Частота, Гц	2500-4000	500-2500	150-250	130-200
Длина волны, м	0.5-1.5	0.7-3	2-6	4-7
Удаление от оси скважины, R	$R = \sqrt{\lambda^2/4 + L\lambda}$	$R = \sqrt{\lambda^2/4 + L\lambda}$	$\lambda/2$	$\lambda/2$
Удаление от оси скважины, м	1.5-3	4-9	1-3	1-4
Результат обработки	Кривая V_P	Разрез Р-волн	Кривая V_L	Разрез L-волн
Погрешность определения скорости	2-5%	-	2-6%	-
Вертикальная разрешающая способность	Шаг $X_{ПП}$	$1/4 - 1/8 \lambda$	Шаг $X_{ПП}$	$1/4 - 1/8 \lambda$
Вертикальная разрешающая способность, м	1	0.25-0.5	1	1-1.5

Совместная реализация процедур скоростного анализа волн продольного типа и гидроволн вместе с построением трасс отраженных волн приводит к получению информации аналогично сейсмическим каротажным исследованиям (рисунок 2.61).

Результаты такого рода многоканального каротажа, проводимого в рамках скважинного профилирования ОГТ, могут быть использованы при

изучении отраженных и преломленных волн, регистрируемых при межскважинном просвечивании и вертикальном сейсмопрофилировании.

1. Разработан способ получения глубинного сейсмического разреза по результатам обработки отраженных волн, регистрируемых при проведении межскважинного сейсмического просвечивания. Способ учитывает резкий скачок скоростей на кровле соляной толщи, вследствие которого головные и отраженные волны из нижнего полупространства могут регистрироваться раньше первых вступлений прямой проходящей волны. Основными этапами получения разреза являются получение скоростного распределения на основании межскважинной многолучевой томографии, выделение отраженных волн из верхнего и нижнего полупространства, миграцию и суммирование. Миграция точек отражения выполняется путем решения прямой задачи на основе лучевой сейсмоки с учетом скоростной модели среды и нарушения монотонности функции времени регистрации отражений от различных горизонтов. Практическое опробование выполнено в сейсмогеологических условиях Верхнекамского месторождения калийных солей. Полученный разрез характеризуется разрешающей способностью 3-5 м по вертикали и 15-20 м по горизонтали.

2. Разработана теория изучения преломленных головных волн, регистрируемых при проведении скважинных исследований, связывающая кажущиеся скорости головных волн со скоростями упругих волн в околоскважинном пространстве и в высокоскоростном преломляющем слое. На основании данной теории предложены способы получения сейсмических изображений и структурно-физических характеристик породного массива.

3. Предложен алгоритм получения суммарной сейсмограммы головных волн, который позволяет повысить точность определения времен первых вступлений, а также изучать вторичное волновое поле, возникающее при прохождении головной волны.

4. Специальный граф обработки суммарной сейсмограммы преломленной волны позволяет выделять преломленно-отраженные волны, формирующиеся

в горизонтально-слоистой среде при прохождении головных волн снизу-вверх вблизи приемной скважины. Предложен способ миграции таких волн для получения глубинного разреза акустической контрастности. Принцип взаимности позволяет строить такие разрезы как для приемной, так и для излучающей скважины.

5. При проведении вертикального сейсмопрофилирования суммирование головных волн позволяет картировать субвертикальные зоны с контрастными сейсмоакустическими свойствами, а также угол их наклона и глубину распространения.

6. Обоснован комплекс скважинных сейсмических исследований для контроля формирования ледопородного ограждения при строительстве шахтных стволов. Совместная интерпретация данных межскважинного просвечивания и скважинного профилирования ОГТ дает надежные результаты при определении толщины ЛПО на всех этапах замораживания.

7. Сейсмические данные скважинного профилирования ОГТ дополнительно могут быть обработаны в идеологии каротажных исследований, в результате строятся кривые скоростей продольных и гидроволн, а также сейсмотрассы их отражений. Большое количество приемных элементов повышает надежность определения скорости (1-5%) и кратность суммирования (20-400).

8. На основании моделирования эффектов конструктивной интерференции головных и отраженных сейсмических волн, выполнены оценки размеров объема Френеля для различных систем наблюдения и определены разрешающие способности скважинных сейсмоакустических методик в типовых сейсмогеологических условиях Верхнекамского месторождения калийных солей.

Глава 3. Разработка аппаратурно-методического обеспечения скважинных сейсмических исследований на основе распределенных оптоволоконных датчиков

Одним из направлений развития представленных методических решений по проведению скважинных сейсмических исследований является внедрение новой технологии сейсмоакустических распределенных волоконно-оптических датчиков. Главное преимущество данной технологии заключается в том, что она позволяет на порядок увеличить количество получаемых данных за счет повышения пространственной плотности каналов и увеличения их количества. При этом внедрение технологии в практику сейсмических исследований на существующем уровне развития оптоволоконных систем требует решения ряда задач, как практического, так и теоретического плана. Так, на данный момент не до конца изучены амплитудно-частотные характеристики оптоволоконной измерительной системы, и ее чувствительность. Кроме того, сложный характер диаграммы направленности диктует необходимость поиска способов регистрации различных классов волн, присутствующих в волновом поле скважинных сейсмических наблюдений.

Системы оптоволоконных распределенных сейсмических датчиков, в англоязычной литературе известные как Distributed Acoustic Sensing (DAS), изучаются за рубежом уже несколько лет [Mateeva, 2012; Parker, 2014; Wu, 2017]. Однако, их широкое внедрение в практику геофизических исследований требует решения определенных практических задач, связанных с физико-геометрическими особенностями таких систем. В России внедрение оптоволоконных акустических систем ведется последние несколько лет, главным образом для выполнения ВСП [Егоров, 2019; Судакова, 2021; Акуленко, 2023; Тулапин, 2023]. Обзор применений DAS в геофизике представлен в работах [Кислов, 2022; Кислов, 2023].

Регистрация акустического сигнала в системе DAS осуществляется за счет анализа обратного рэлеевского рассеяния света в оптоволокне, которое возникает при прохождении светового импульса. Продольная деформация волокна приводит к изменению фазовых соотношений между участками оптического волокна [Parker, 2014]. Оптическая интерферометрия полей двух когерентных пространственно разнесенных импульсов позволяет вычислять деформацию или скорость деформации на определенном участке, положение которого может быть найдено по времени прихода отраженного оптического импульса при известной скорости света в волноводе [Hartog, 2013; Shatalin, 1997]. Единичная база приема G (Gauge Length), на которой производятся измерения, определяется пространственным расстоянием между двумя зондирующими импульсами. В результате последовательной регистрации обратно-рассеянного света, возникшего при прохождении зондирующей посылки вдоль всей длины волокна, формируется так называемая рефлектограмма, изменения в которой во времени позволяют вычислить мгновенный профиль распределения напряжений. Повторный опрос ограничивается временем прихода отраженного сигнала от самого удаленного участка оптоволоконной магистрали. Скорость распространения света в оптоволокне составляет 2×10^8 м/с, для линии 1 км двойное время пробега импульса света составляет 10^{-5} сек, а для 100 км – 10^{-3} сек, соответственно эти значения являются в настоящее время ограничением дискретизации регистрируемого сигнала по времени.

3.1. Амплитудно-частотный отклик распределенного акустического сенсора DAS со спиральной намоткой волокна

Спектральный состав сигналов, регистрируемых оптоволоконными датчиками с линейным волокном, рассмотрен в работах [Dean, 2015; Dean, 2017; Vona, 2017]. Поскольку измерения DAS предполагают осреднение измеряемого параметра на базе приема L , возникает искажение спектра акустического сигнала при частотах выше 150-300 Гц [Stork, 2020; Näsholm,

2022]. Сигналы с верхней границей спектра, не превышающей эти значения, подходят для решения задач нефтяной сейсморазведки [Willis, 2016; Судакова, 2021] и мониторинга рудных месторождений [Reidel, 2018; Bellefleur, 2020]. В скважинной и шахтной сейсморазведке верхняя граница частотного диапазона полезного сигнала составляет 1000 Гц и выше [Yaroslavtsev, 2020; Санфилов, 2002; Chugaev, 2022], поэтому необходимо рассмотреть возможности применения распределенных оптоволоконных систем для решения горнотехнических задач, сравнить с существующими сейсмоакустическими системами сбора данных. Кроме того, на данный момент в литературе отсутствует анализ амплитудно-частотных характеристик кабеля со спиральной укладкой волокна.

3.1.1. Диаграмма акустической направленности прямого оптоволоконна

Сигнал, регистрируемый оптоволоконной системой, можно записать как [Daley, 2015]:

$$\left[u \left(z + \frac{G}{2}, t + dt \right) - u \left(z - \frac{G}{2}, t + dt \right) \right] - \left[u \left(z + \frac{G}{2}, t \right) - u \left(z - \frac{G}{2}, t \right) \right], \quad (3.1)$$

где $u(z,t)$ – смещение волокна в точке z на времени t , G – база приема, а dt – дискретизация по времени. Таким образом, измеренное значение является скоростью деформации $\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)$, либо производной вдоль кабеля скорости смещения частиц $\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)$. В работе [Correa, 2017] показано, что согласование фаз измерений оптоволоконной системы и велосиметров можно осуществить путем последовательного выполнения интегрирования и инверсии полярности сигнала.

Физико-геометрические аспекты падения сейсмической волны на линейный участок оптоволоконна рассмотрены в работах [Wu, 2017; Willis, 2016; Kuvshinov, 2016]. Поскольку системы DAS измеряют деформацию оптоволоконна вдоль его оси, то для продольных волн диаграмма направленности определяется как $A = A_0 \cos^2 \alpha$, для поперечных волн $A = A_0$

$|\sin 2\alpha|$ [Mateeva, 2012; Correa, 2017], где α – угол между волокном и вектором распространения волны (рисунок 3.1).

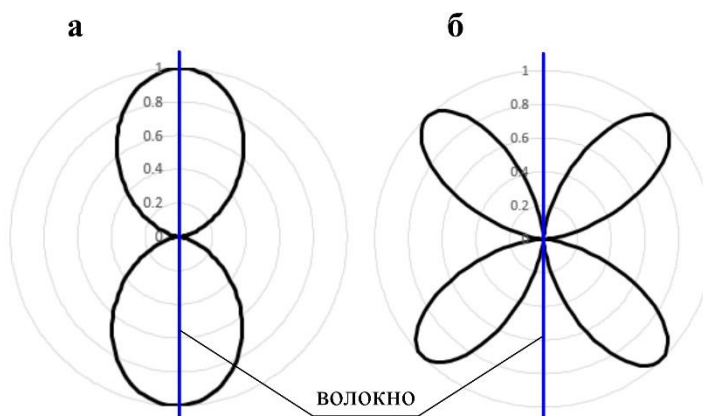


Рисунок 3.1 – Диаграммы направленности оптоволоконных датчиков для продольных (а) и поперечных волн (б) (по [Матеева, 2012])

Такая диаграмма направленности существенно ограничивает круг возможностей при решении сейсморазведочных задач, поскольку во многих стандартных случаях сейсмических исследований целевые волны приходят по нормали к приемной линии.

Применение специальных кабелей с нестандартной укладкой волокна может расширить возможности оптоволоконных систем для решения сейсмоакустических задач. Варианты конструкции кабеля приведены в патенте [Воег, 2013]. С технологической точки зрения производства кабеля наиболее доступным способом укладки волокна является спиральная намотка, натурные измерения сейсмических работ с таким кабелем описаны в работах [Tertyshnikov, 2020; Stork, 2020].

3.1.2. Влияние угла намотки на эффективную базу приема кабеля

При спиральной намотке, длина волокна, уложенного в кабеле, будет больше, чем длина кабеля. Таким образом, будет изменяться и эффективное значение связанного с кабелем породного массива.

Коэффициент удлинения волокна можно найти по формуле:

$$w = G/G_H = 1/\cos \theta, \quad (3.2)$$

где θ - угол отклонения направляющей волокна от оси кабеля (для прямого волокна $\theta = 0^\circ$)¹, G – база приема вдоль волокна, G_H – база приема вдоль кабеля со спиральной намоткой волокна.

3.1.3. Влияние угла намотки на чувствительность кабеля

При изменении диаграммы направленности кабеля за счет намотки, можно представить единичный отрезок спирали в виде линейного участка с эквивалентным распределением чувствительности по осям (рисунок 3.2). В параметрическом виде энергия сигнала будет распределяться следующим образом:

$$\begin{aligned} E_z &= E \cos^2 \theta \\ E_r &= E \sin^2 \theta \\ E_{x,y} &= E \sin^2 \theta / 2 \end{aligned} \quad (3.3)$$

где E – полная чувствительность, E_z – чувствительность по оси z , E_r - в плоскости перпендикулярной оси z , E_x, E_y по осям x и y .

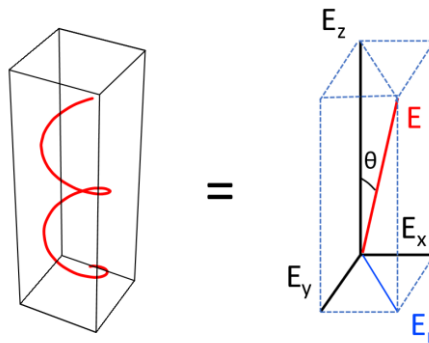


Рисунок 3.2 – Распределение чувствительности по осям при спиральной намотке волокна

На единице длины кабеля увеличение зарегистрированной энергии будет происходить за счет увеличения длины волокна и количества трасс, вследствие уменьшения эффективного значения G согласно формуле (3.2).

¹ В литературе существует два различных способа отсчета угла намотки. Кувшинов, Braid, Innapen и др. принимают для прямого волокна 90° , в то время как в работах Егорова, Тертышникова и др. прямому волокну соответствует 0° . В работе используется последний вариант нотации.

Алгоритм численного расчета диаграммы направленности кабеля за счет намотки приведен в работах [Baird, 2020; Egorov, 2021].

С увеличением угла намотки волокна появляется чувствительность системы по нормали к оси кабеля. Диаграмма направленности для продольных волн меняется с диаграммы одноосевого датчика в сторону диаграммы датчика давления, имеющего равномерную (сферическую) диаграмму. Чувствительность равномерно распределяется по осям при значении угла намотки $\theta_c = \arccos(1/\sqrt{3}) \approx 54,7^\circ$ [Kuvshinov, 2016; Baird, 2020].

Таким образом, при равномерной диаграмме направленности (шарообразной) по одной оси зарегистрированная энергия будет в 3 раза меньше, и амплитуда сигнала уменьшится в $\sqrt{3}$ раз, по сравнению с прямым волокном.

Суммарный сигнал от воздействия сейсмической волны со спиральным волокном складывается из ее взаимодействия с эквивалентными участками, разложенными по ортогональным осям. Для продольных волн сигналы будут складываться, а для поперечных волн – вычитаться (рисунок 3.3).

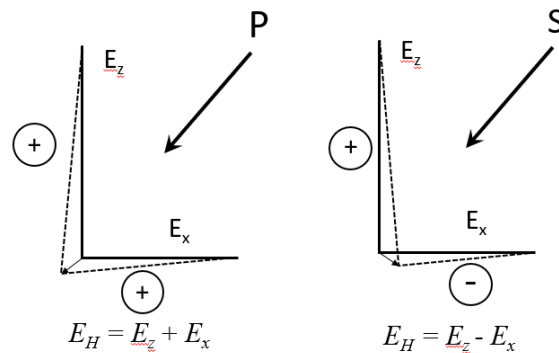


Рисунок 3.3 – Схема изменения длины волокна под воздействием продольных (а) и поперечных (б) волн

Диаграмма направленности симметрична относительно оси кабеля и зависит от углов намотки и падения сейсмической волны в соответствии с выражением (3.3):

$$D_P(\alpha, \theta) = \cos^2 \alpha \cos^2 \theta + 1/2 \sin^2 \alpha \sin^2 \theta \quad (3.4)$$

$$D_S(\alpha, \theta) = |\sin 2\alpha \cos^2 \theta| - 1/2 |\sin 2\alpha \sin^2 \theta|, \quad (3.5)$$

где D_P, D_S – направленность соответственно для P и S волн, α – угол между кабелем и лучом сейсмической волны. В графическом виде диаграммы приведены на рисунке 3.4.

Заметим, что полученные данные отличаются от приведенных в работе [Braid, 2020], где полярность сигнала S-волн меняется в зависимости от направления распространения оптического сигнала в волокне. Однако, это означало бы, что при измерении одного и того же участка кабеля путем подключения с разных концов оптической линии давало бы различный результат, что противоречит экспериментальным данным.

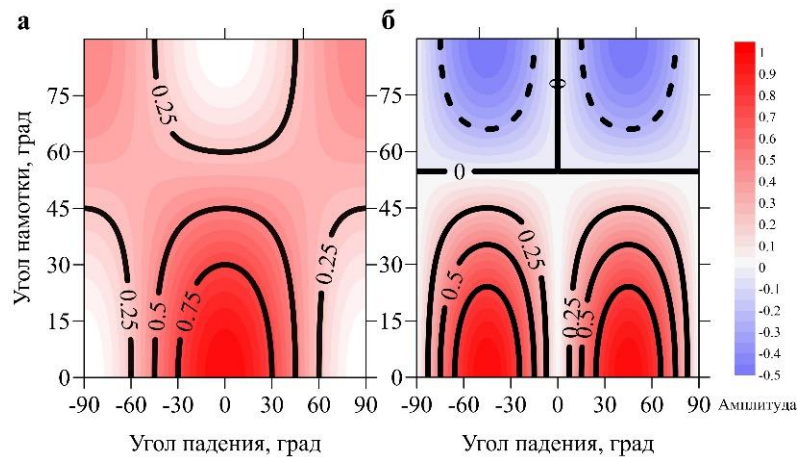


Рисунок 3.4 – Зависимости чувствительности кабеля со спиральной укладкой волокна от углов падения волны и намотки волокна для P(а) и S(б) волн

3.1.3. Частотные характеристики регистрируемого сигнала для прямого волокна

Рассмотрим момент времени, когда монохроматическая упругая волна с частотой колебаний f создала продольные напряжения в волокне, растянутом вдоль оси z . В этом случае амплитуда регистрируемого сигнала будет изменяться согласно выражению

$$A(x) = A_0 \sin(kz),$$

где $k = 2\pi f/V$, волновое число, A_0 – максимальная амплитуда сигнала.

Амплитуда сигнала, измеренного на отрезке длины G равна сумме амплитуд вдоль этого отрезка:

$$A_L = A_0 \int_0^G \sin(kz) dz = A_0 \frac{V}{2\pi f} \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi f G}{V}\right) \right). \quad (3.6)$$

Здесь мы видим, во-первых, что с ростом частоты амплитуда сигнала падает. Во-вторых, в точках, удовлетворяющих условию $G = n\lambda$, $n \in \mathbb{Z}$, функция принимает нулевое значение. В результате, амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) осложнена участками ослабления сигнала в результате действия прямоугольного оконного фильтра, каким представляется протяженный линейный приемник. АЧХ для продольных волн, распространяющихся вдоль волокна со скоростью $V = 2500$ м/с, и базы измерения $G = 10$ м приведена на рисунке 3.5.

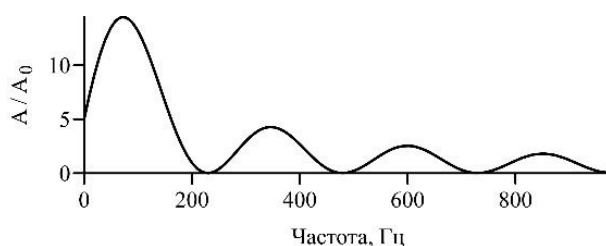


Рисунок 3.5 – Амплитудно-частотная характеристика системы при прохождении волны вдоль прямого волокна

3.1.4. Зависимость амплитудно-частотных характеристик от угла падения волны.

При расположении линейного приемника в поле гармонической волны (рисунок 3.6) видимая длина волны будет увеличиваться при увеличении угла α между направлением распространения волны и линией приема от 0° до 90° . Видимое волновое число, в свою очередь, будет уменьшаться:

$$k_\alpha = k / \cos \alpha. \quad (3.7)$$

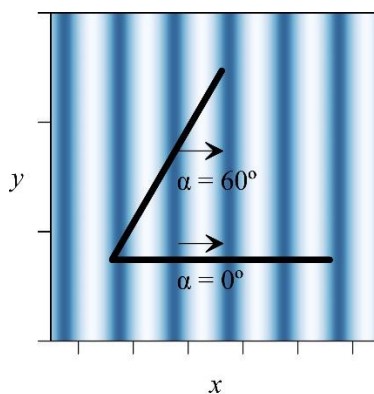


Рисунок 3.6 – Изменение видимого периода при разных углах подхода волны

Для участка прямого волокна и произвольного угла падения волны α зависимость АЧХ от угла падения может быть найдена как произведение амплитудной характеристики (3.6) и диаграммы направленности, с учетом видимой длины волны вместо действительной (3.7):

$$A_G(\alpha, f) = A_0 \frac{1}{k |\cos \alpha|} (1 - \cos(Gk |\cos \alpha|)) D(\alpha). \quad (3.8)$$

Такая зависимость для продольных волн при $G = 10$ м, $V_P = 2500$ м/с, $V_S = 1500$ м/с представлена на рисунке 3.7. На данной характеристике обращают на себя внимание участки режекции в виде «улыбок» и малая чувствительность при углах близких к $\pm 90^\circ$.

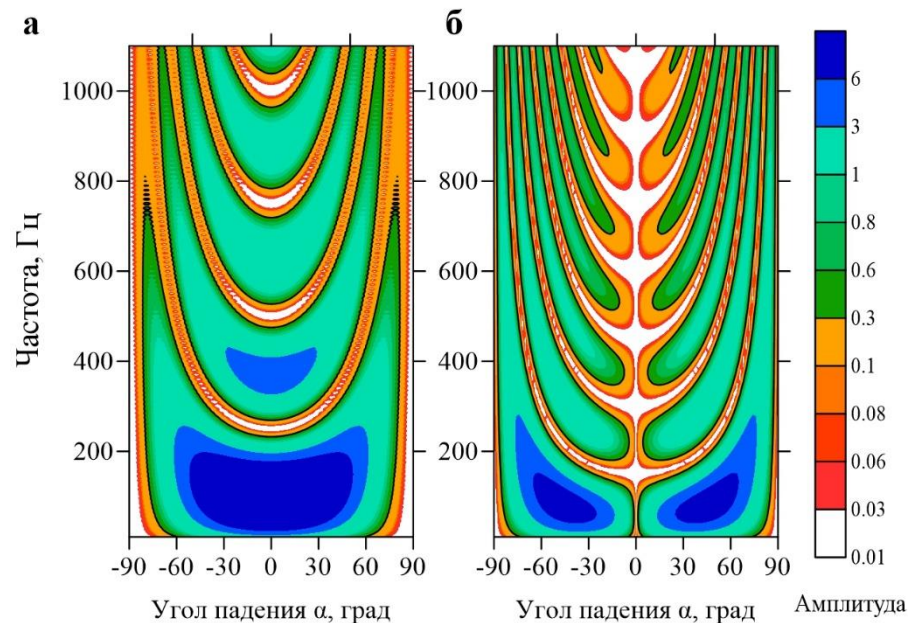


Рисунок 3.7 – Амплитудно-частотная характеристика участка прямого волокна при различных углах падения упругой волны для продольных (а) и поперечных (б) волн

3.1.5. Амплитудно-частотная характеристика спирального волокна

Далее рассмотрим кабель радиуса r_c со спиральной укладкой волокна, на который волна падает под углом α . Угол падения волны на отдельные малые участки равен $\alpha + \varphi(z)$ (рисунок 3.8), где $\varphi(z)$ можно найти через производную функции, описывающей спиральное волокно в плоскости (z, x) :

$$x(z) = r_c \sin(\operatorname{tg}\theta z/r_c), \quad (3.9)$$

откуда

$$\varphi(z) = \operatorname{arctg}(\operatorname{tg}\theta \cos(z \operatorname{tg}\theta/r_c)). \quad (3.10)$$

Функция $\varphi(z)$ принимает значения от $-\theta$ до θ , и при условии, что длина волны намного больше шага между витками в кабеле, отклик будет равен сумме

$$A_H(f, \alpha, \theta) = \sum_{\varphi=-\theta}^{\theta} A_G(f, \alpha + \varphi(z)) \Delta z(\varphi) / z, \quad (3.11)$$

где множитель $\Delta z(\varphi)/z$ выполняет роль весового коэффициента, зависящего от доли участков с фиксированным значением угла φ в общей длине волокна.

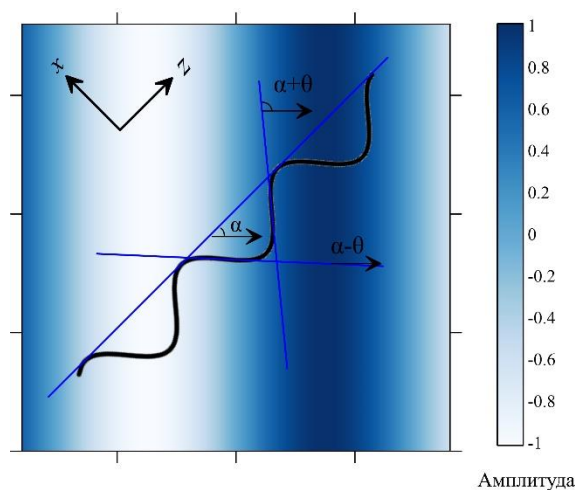


Рисунок 3.8 – Спиральное волокно в поле упругой волны

Распределение углов можно найти путем вычисления производной функции $z(x) = r_c \operatorname{ctg}(\theta) \operatorname{arcsin}(x/r_c)$:

$$\frac{dz}{dx} = \frac{\operatorname{ctg}(\theta)}{\sqrt{1 - (x/r_c)^2}}, \quad (3.12)$$

для которой $x \in [-r_c, r_c]$ и углы меняются от $-\theta$ до θ . Пример распределения φ для угла намотки 45° приведен на рисунке 3.9.

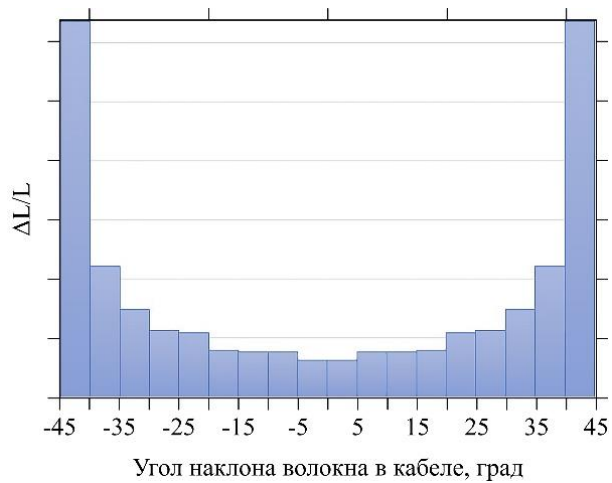


Рисунок 3.9 – Распределение углов наклона волокна относительно оси кабеля при спиральной намотке 45°

Для продольных волн по формуле (3.11) получены амплитудно-частотные характеристики для различных углов намотки волокна в кабеле (рисунок 3.10).

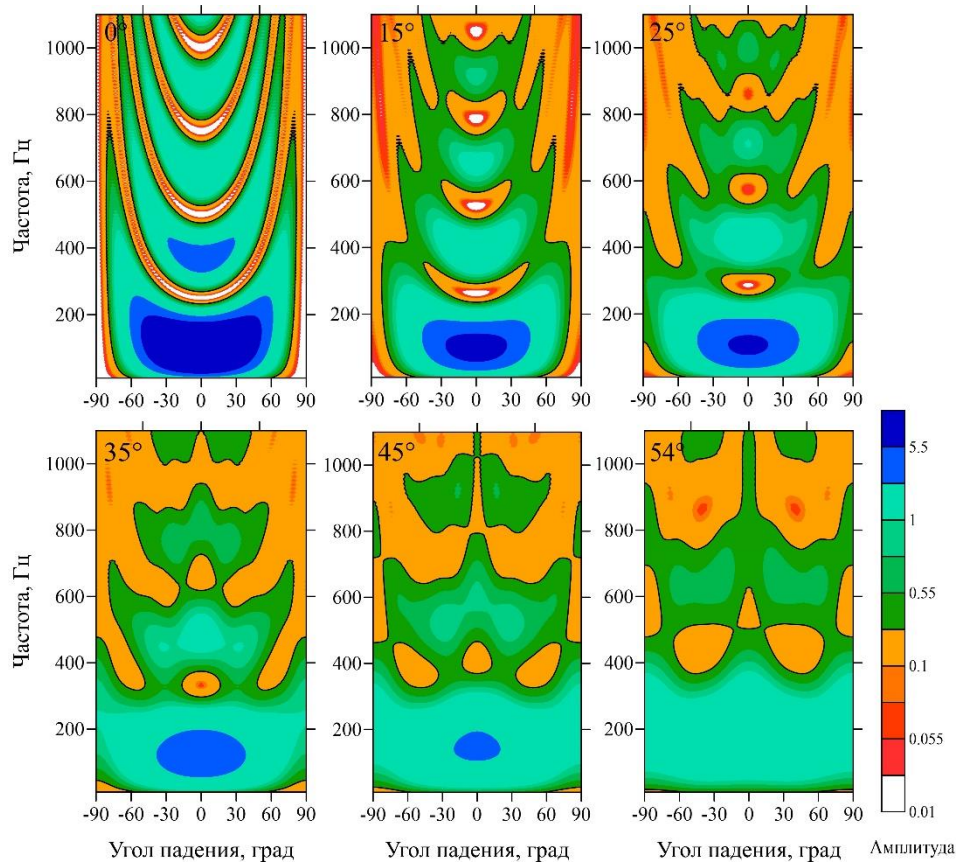


Рисунок 3.10 – Амплитудно-частотные характеристики кабеля для различных углов намотки волокна

С увеличением угла намотки полосы режекции размываются, в результате отклик становится более равномерным по углам падения. По частотам присутствуют провалы чувствительности, хотя и менее выраженные, чем для прямого волокна, что оставляет возможности для отбеливания спектра.

Важным случаем здесь является угол падения волны 90° , отклик при котором вынесен отдельно на рисунок 3.11. Из графиков видно, что есть полосы частот, в которых происходит увеличение амплитуды сигнала при увеличении угла намотки, и полосы, где усиление не происходит.

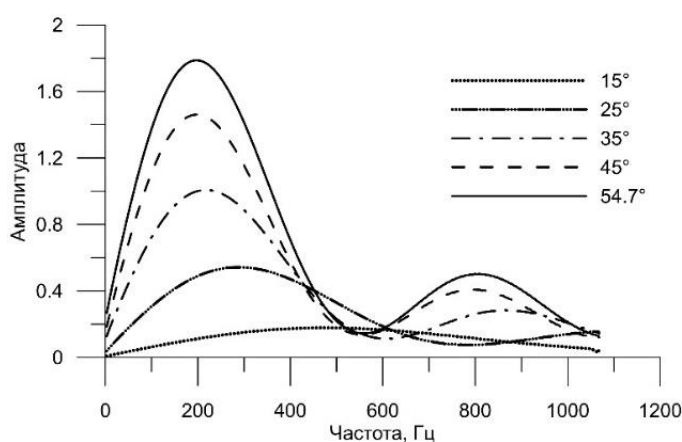


Рисунок 3.11 – Отклик кабеля со спиральной укладкой волокна при различных углах намотки и падением продольной волны по нормали к кабелю.

С увеличением угла намотки эффективная база приема уменьшается в соответствии с формулой (3.2), что, в свою очередь, приводит к увеличению частоты первого минимума в суммарном частотном отклике. Данный факт позволяет при суммировании сигналов с прямого и спирального волокна получить более равномерную частотную характеристику в большом диапазоне углов падения волны на кабель (рисунок 3.12), за исключением углов падения близких 90° , где АЧХ зависит только от спирального волокна.

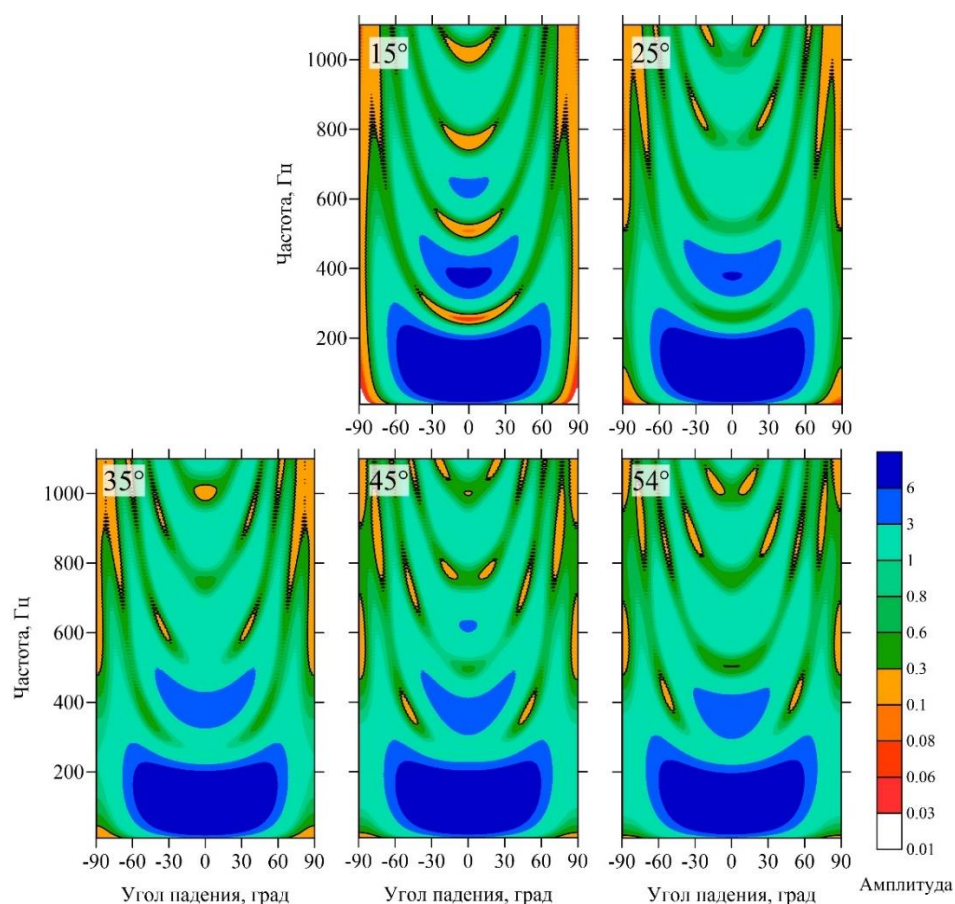


Рисунок 3.12 – Амплитудно-частотные характеристики суммарного сигнала с прямого и спирального волокна с разными углами намотки.

3.1.6. Радиус изгиба волокна, затухание оптического сигнала от угла намотки

Стандартное телекоммуникационное волокно имеет определенную линейку типоразмеров и маркировок, при этом одной из основных характеристик является зависимость коэффициента затухания сигнала от радиуса изгиба волокна.

Радиус изгиба определяется в плоскости, в которой он максимален. При равномерной спиральной намотке радиус кривизны постоянный и совпадает с радиусом минимальной кривизны эллипса, образуемого при сечении кабеля плоскостью под тем же углом, что и угол намотки (рисунок 3.13). Таким образом, эффективный радиус кривизны волокна будет зависеть от радиуса заложения волокна в кабеле r_c и угла намотки θ :

$$R_E = r_c / \sin^2 \theta \quad (3.13)$$

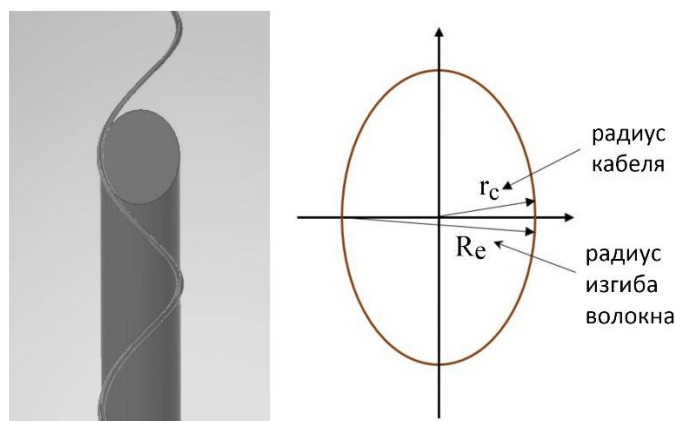


Рисунок 3.13 – Схема определения эффективного радиуса изгиба волокна

Принимая R_E в качестве фиксированного значения, определяемого выбранным типом волокна, можно получить зависимость радиуса кабеля от угла намотки θ : $r_c = R_E \sin^2 \theta$. Масса такого кабеля будет пропорциональна $\sin^4 \theta$.

Для волокна стандарта G657.A2 радиус изгиба, при котором не возникает потерь на значительном количестве витков, составляет 30 мм. Исходя из такого значения радиуса и угла намотки 45° , спроектирован кабель, содержащий одновременно прямое и спиральное волокно (рисунок 3.14). Фактический угол намотки оказался меньше проектного и составил 40° . Внешний диаметр кабеля составляет 32.6 мм, масса 721 кг/км. Такой кабель может быть использован как для поверхностных сейсмических измерений, так и для скважинных.



Рисунок 3.14 – Кабель, содержащий спиральное и прямое волокно

3.2. Натурные эксперименты

Для оценки новых информационных возможностей предлагаемых методических решений скважинных сейсмических исследований с применением оптоволоконных систем регистрации проведена серия сравнений стандартных гидрофонных датчиков и оптоволоконной системы DAS с различными типами кабеля, содержащего как прямое, так и спиральное волокно. Сравнения проведены в условиях водонаполненных скважин, что обеспечивает высокую степень повторяемости сигнала и более высокое отношение сигнал/шум, чем при наземных измерениях. В качестве источника упругих волн использован электроискровой излучатель, с энергией 600-2500 Дж.

3.2.1. Сравнение гидрофонов и кабеля с прямым волокном при проведении МСП

Первоначально проведен наиболее простой вариант сравнения: оптоволоконная система с прямым кабелем, система наблюдений – межскважинное просвечивание.

Расстояние между скважинами составляет 150 м, интервал возбуждения 105-164 м, интервал приема 127-198 м. В качестве источника упругих колебаний использован электроискровой излучатель с энергией разряда 2500 Дж, регистрация велась с помощью пьезокерамических гидрофонов и DAS. Шаг пунктов возбуждения (ПВ) – 1 м, шаг пунктов приема (ПП) для гидрофонов - 1 м, для DAS - 0.25 м (рисунок 3.15). Геологическое строение участка и волновое поле при межскважинном просвечивании рассмотрено в главе 1.

На каждом ПВ выполнено 4 накопления. Для повышения интенсивности сигнала соседние трассы DAS просуммированы на базе 1 м (каждые 4 трассы). Это обеспечило возможность прямого сравнения с данными, полученными с гидрофонов. Такой подход возможен, поскольку длины регистрируемых волн

составляют 5-20 м, соответственно суммирование вызовет снижение верхней границы спектра полезного сигнала на 10 % или менее.

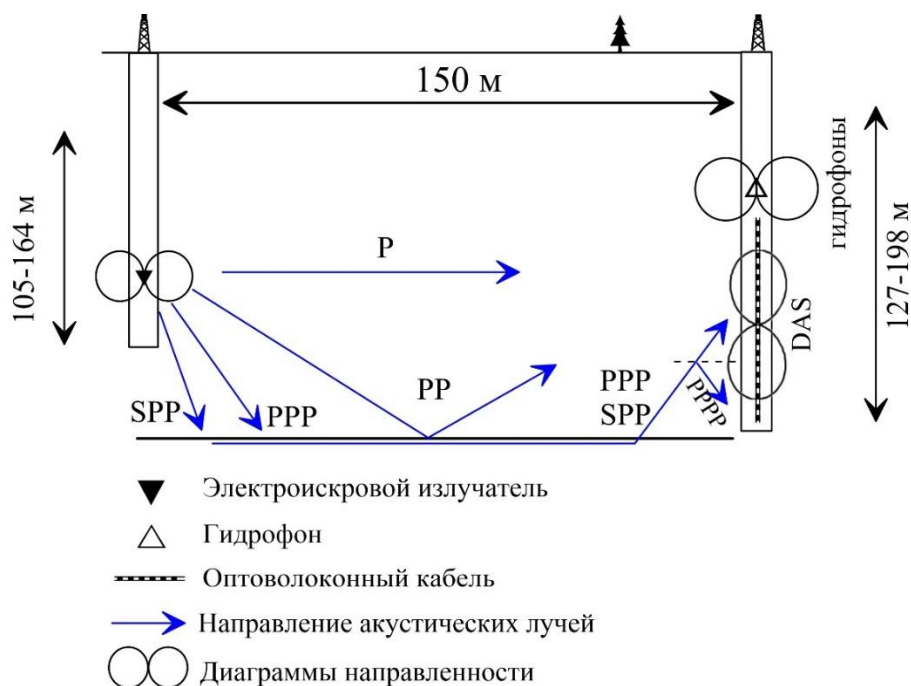


Рисунок 3.15 – Параметры системы наблюдений и схема хода лучей

Регистрация сигнала гидрофонов осуществлялась станцией ИМ2416, регистрация DAS с помощью iDAS2 Silixa. Время регистрации 300 мс, дискретизация 0.2 мс (5000 Гц). База приема составляет 10 м. Использовано одномодовое оптоволокно G.657.A1 в кабеле диаметром 5 мм «MultiSense» производства завода «Инкаб». Особенностью такого кабеля является укладка волокна без оптического модуля и практически без запаса длины, что должно обеспечивать лучшую передачу акустического сигнала из массива к волокну за счет жесткого сцепления волокна и изоляции кабеля.

Сравнение первичных сейсмограмм общего пункта возбуждения (ОПВ) и общего пункта приема (ОПП) приведено на рисунках 3.16 и 3.17. АЧХ системы DAS с предложенными параметрами см. на рисунке 3.7.

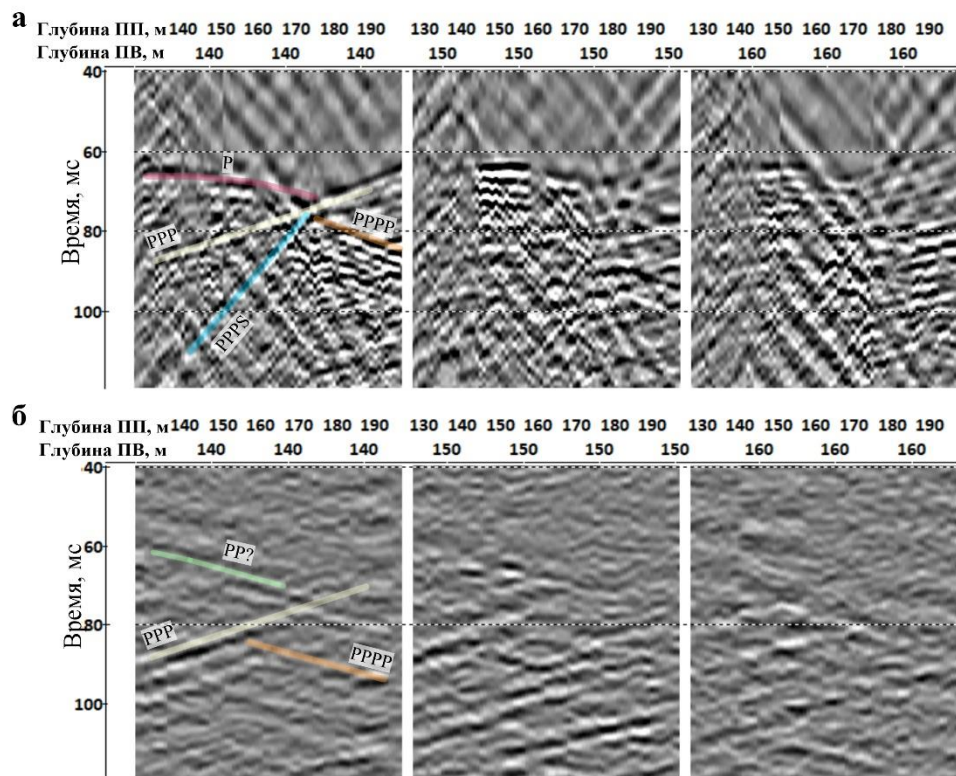


Рисунок 3.16 – Сейсмограммы общего ПВ, полученные с помощью гидрофонов (а) и DAS (б)

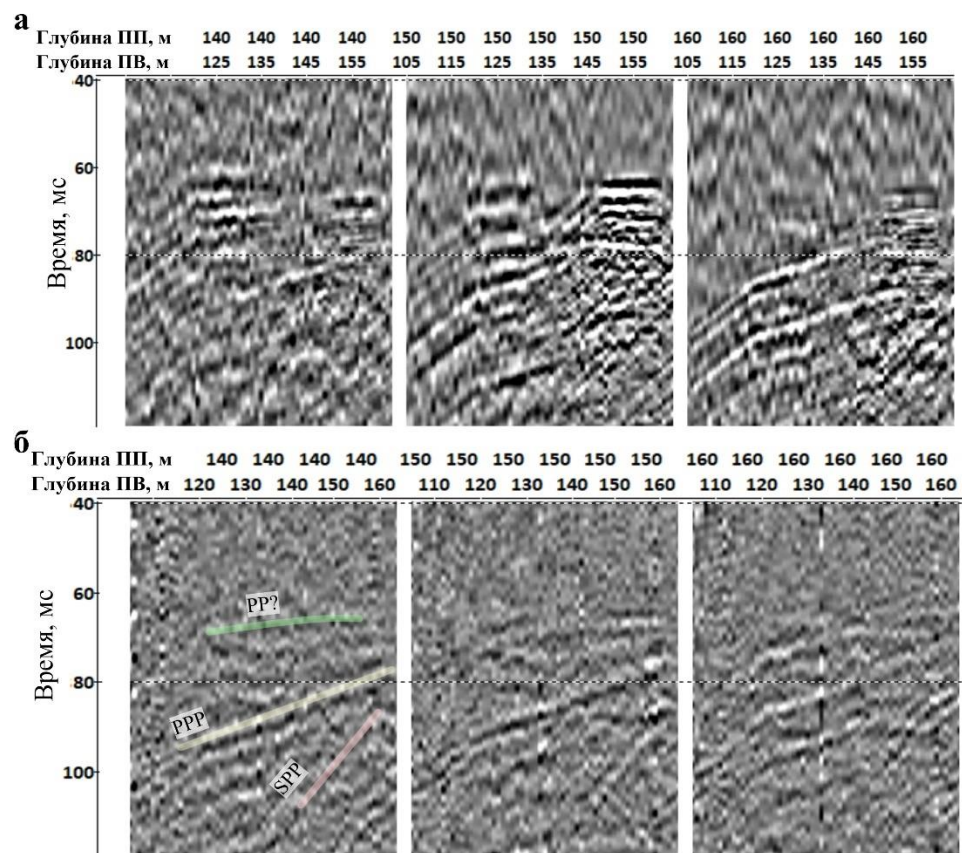


Рисунок 3.17 – Сейсмограммы общего ПП, полученные с помощью гидрофонов (а) и DAS (б)

Наиболее интенсивный сигнал на сейсмограммах DAS представлен преломленной головной волной (PPP), формирующейся на кровле каменной соли. Кроме того, присутствуют отражения этой волны от горизонтальных границ (PPPP – преломленно-отраженные волны). В сортировке ОПП достаточно ясно прослеживается головная волна SPP, поскольку ход лучей у регистрирующей скважины для волн PPP и SPP идентичный. Прямая продольная волна (время регистрации 62-70 мс) на сейсмограммах DAS ожидаемо отсутствует, поскольку она попадает в минимум диаграммы направленности, однако вторичное поле, образуемое прямой волной, можно различить на временах 65-70 мс (см. рисунок 3.16б). Сюда входят отраженные продольные и обменные поперечные волны от горизонтальных сейсмогеологических границ. Существенное различие волнового состава на сейсмограммах обусловлено различными диаграммами направленности гидрофонов и кабеля с прямым оптоволоконном (см. рисунок 3.15).

Считая спектр сигнала, зарегистрированного с помощью гидрофонов, близким к истинному (рисунок 3.18а) и сравнивая его со спектром DAS можно сделать вывод, что шум станции DAS на приведенных сейсмограммах сопоставим по интенсивности с полезным сигналом и повышается с увеличением частоты, что по всей видимости связано с процедурами выравнивания спектра, заложенными в алгоритмы регистрации сигнала оптоволоконной системой.

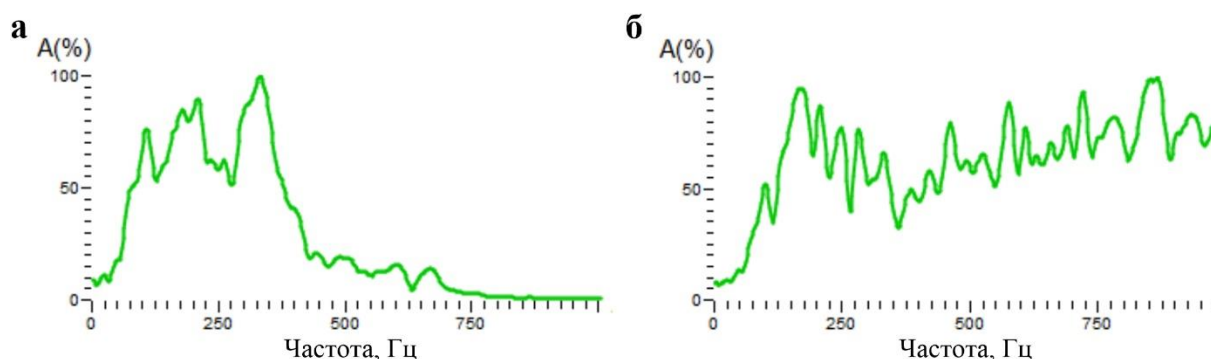


Рисунок 3.18 – Амплитудные спектры сейсмограмм для гидрофонов (а) и DAS

(б)

Имеющаяся волновая картина, зарегистрированная с помощью DAS, может быть улучшена путем суммирования головных волн, способом, описанным в параграфе 2.2.2.

На рисунке 3.19 приведены варианты суммирования с разным количеством накоплений от 2 до 60 пунктов возбуждения. Наблюдается заметное улучшение прослеживаемости годографов, особенно для вторичного волнового поля, которое на исходных сейсмограммах практически не различимо.

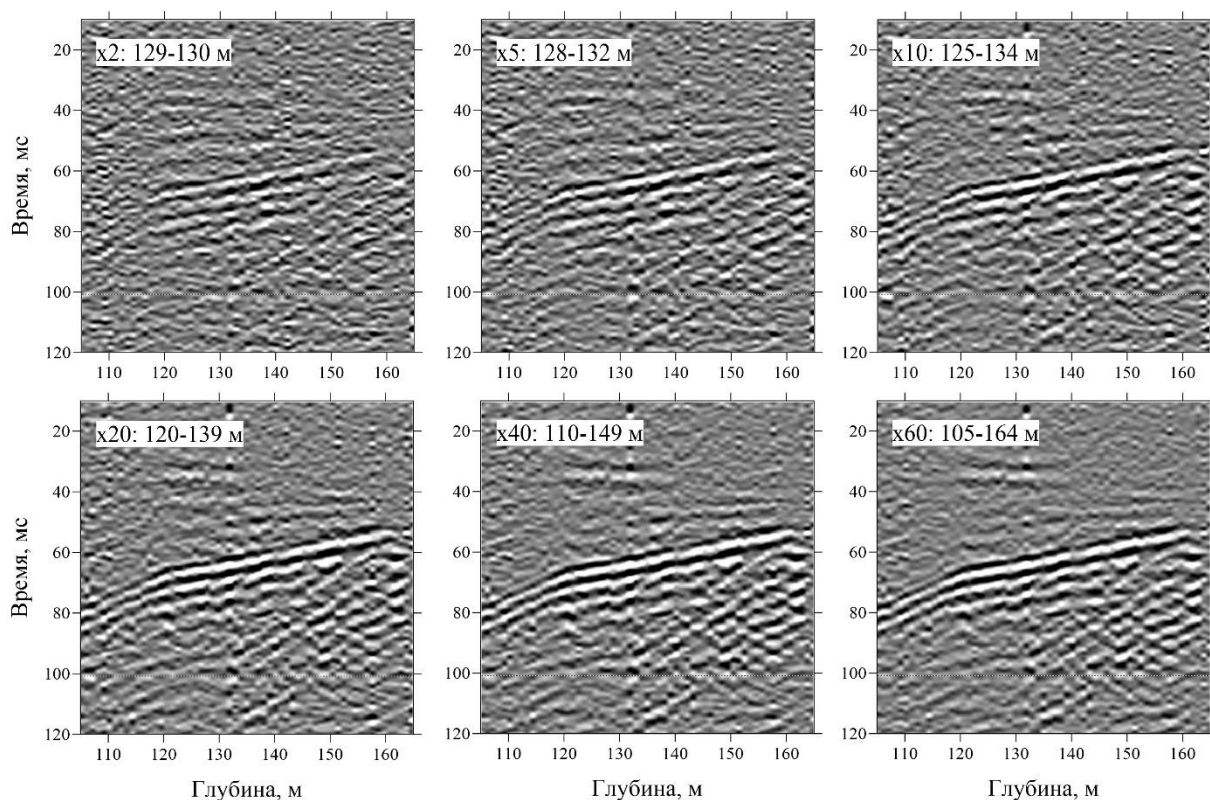


Рисунок 3.19 – Суммирование головных волн при разном количестве ПВ (регистрация DAS)

Для полноценного сравнения волновых картин, зарегистрированных с помощью гидрофонов и DAS выполнена идентичная обработка сигналов (за исключением пункта 2):

1. 4-х кратное накопление на одной точке пункта возбуждения.
2. Для DAS суммирование 4 трасс на базе 1 м (приведение шага ПП к 1 м).
3. Полосовая фильтрация 50-100-1000-2000 Гц.

4. Снятие первых вступлений головной волны.

5. Ввод временных поправок для приведения поля головных волн к одному времени.

6а. Суммирование по общему пункту приема (волновая картина у возбуждающей скважины). Результаты на рисунке 3.20.

6б. Суммирование по общему пункту возбуждения (волновая картина у регистрирующей скважины). Результаты на рисунке 3.21.

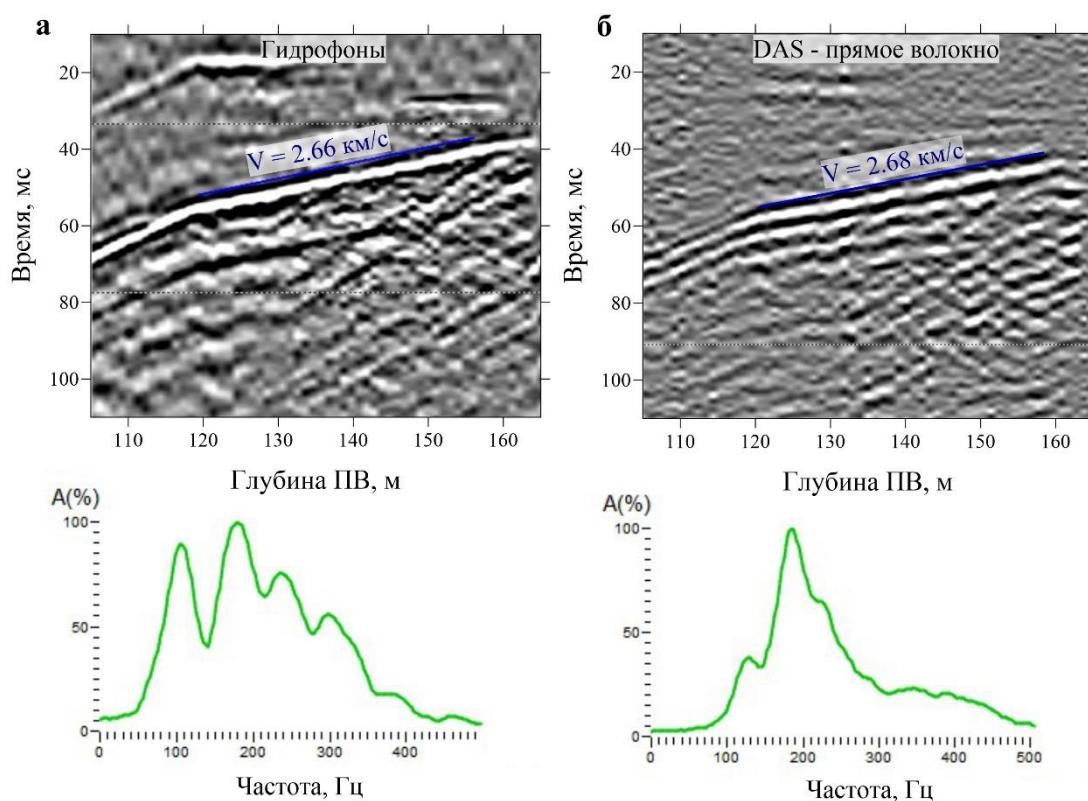


Рисунок 3.20 – Сравнение суммарных сейсмограмм ОПП и амплитудных спектров сигналов гидрофонов (а) и DAS (б)

Сравниваемые суммарные сейсмограммы качественно полностью соответствуют исходным данным, но характеризуются существенно более высоким отношением сигнал-шум. Выводы по волновым картинам вблизи излучающей и приемной скважины отличаются.

Поскольку диаграммы направленности электроискрового излучателя и гидрофона весьма похожи, то в сортировке общего пункта приема волновое поле вблизи излучающей скважины весьма сходно для гидрофонов и DAS (см. рисунок 3.20).

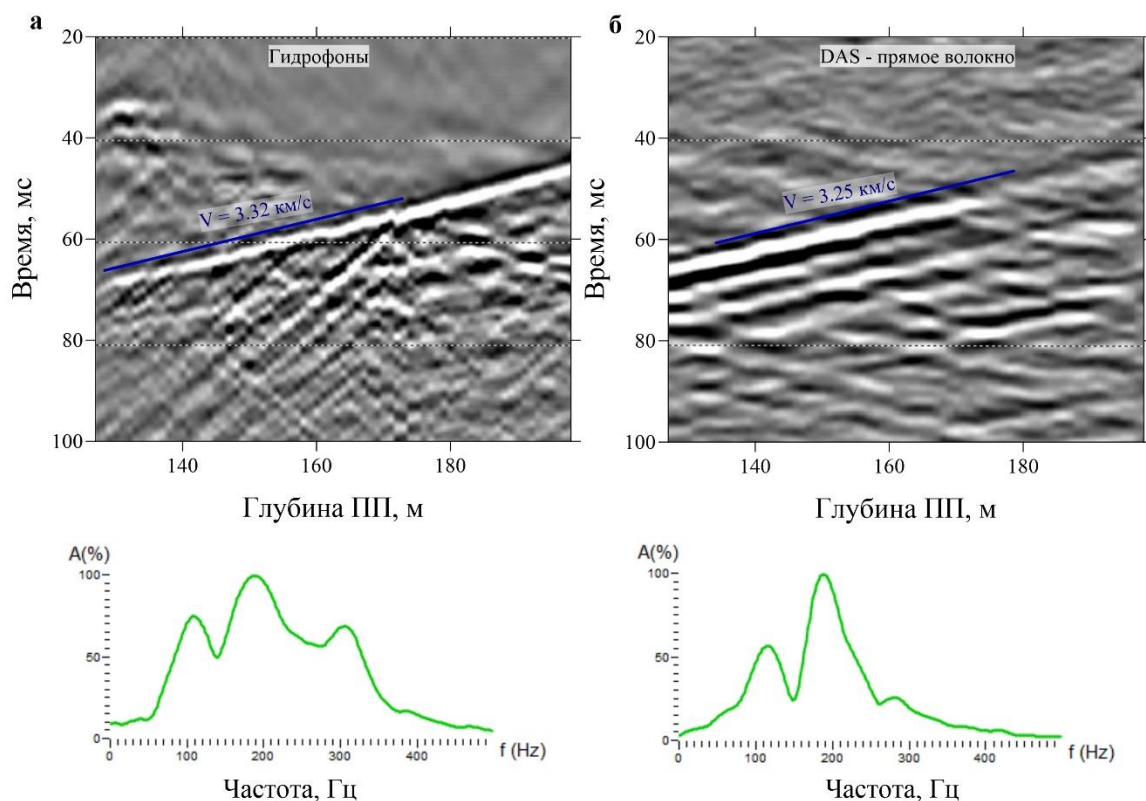


Рисунок 3.21 – Сравнение суммарных сейсмограмм ОПВ и амплитудных спектров гидрофонов (а) и DAS (б)

Для приемной скважины диаграмма направленности прямого волокна оказывает существенное фильтрующее влияние на волновое поле, вследствие чего регистрируются лишь отдельные классы волн, в данном случае продольные головные PPP и преломленно-отраженные PPPP волны.

На частотный состав сигналов, полученных с помощью DAS, оказывает влияние осреднения на базе измерения (см. рисунок 3.7), что в данном случае привело к выпадению частот 250-350 Гц и сужению амплитудного спектра.

3.2.2. Сравнение гидрофонов и кабеля со спиральным волокном при МСП

На следующем этапе выполнено сравнение гидрофонов и системы DAS с применением кабеля, содержащего спиральное волокно. Регистрация DAS осуществлялась с помощью интеррогатора iDAS2 Silixa, и оптоволоконной

линии, смонтированной одновременно в 5 скважинах (рисунок 3.22).
 Параметры системы наблюдения приведены в таблице 3.1.

Организация оптической линии по схеме кольца, когда концы линии физически приходят в один оптический шкаф, во-первых, облегчает тестирование линии на целостность, а во-вторых, позволяет производить запись поочередно в обе стороны, уменьшая эффект затухания оптического сигнала.

Таблица 3.1.

Параметры системы наблюдения

Общая оптическая длина приемной линии	6300 м
Суммарная длина полезных участков приемной линии	3100 м
Шаг пунктов приема	0.5 м
Количество регистрирующих каналов в скважинах	6200 ед
Общее оптическое затухание на линии	3.5 dB
База приема (Gauge length)	10 м
Длина записи	300 мс
Шаг дискретизации по времени	0.2 мс

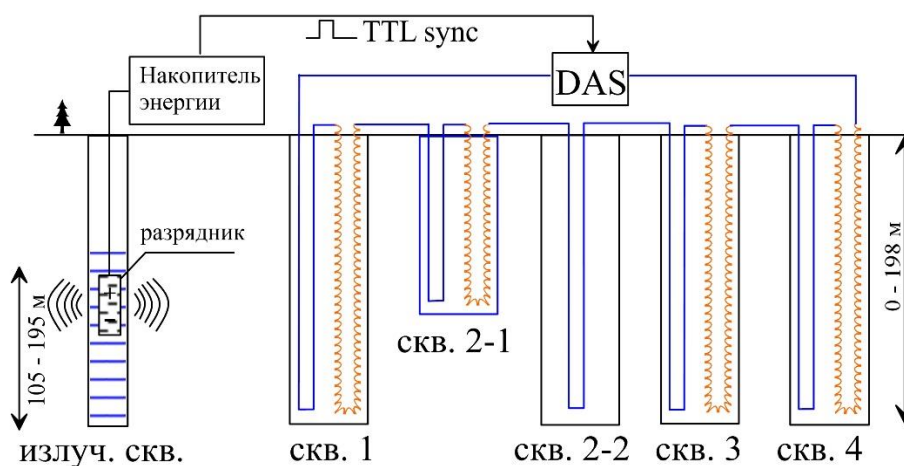


Рисунок 3.22 – Схема возбуждения сейсмоакустических колебаний и регистрации системой DAS

Возбуждения акустического сигнала осуществлялись в скважине электроискровым источником с единичным воздействием 2500 Дж. Накопитель электрической энергии, расположенный на поверхности, по

магистральному кабелю подавал разряд на излучатель в скважине. Излучатель перемещался по скважине в интервале глубин 105-195 м. На каждом пункте возбуждения выполнялось 16 накоплений регистрируемого сигнала для последующего суммирования и повышения отношения сигнал/шум. Синхронизация начала записи осуществляется путем формирования TTL импульса накопителем и подачей на вход интеррогатора DAS. Все скважины обсажены пластиковой колонной ПВХ и заполнены водой начиная с глубины 100 м. Выше 100 м воды нет ни в трубе, ни в затрубном пространстве.

При межскважинном просвечивании на изучаемом участке наиболее интенсивными являются прямая проходящая и головная волна, также присутствуют отраженные волны. Диаграммы направленности и схема подхода лучей при межскважинном просвечивании приведена на рисунке 3.23.

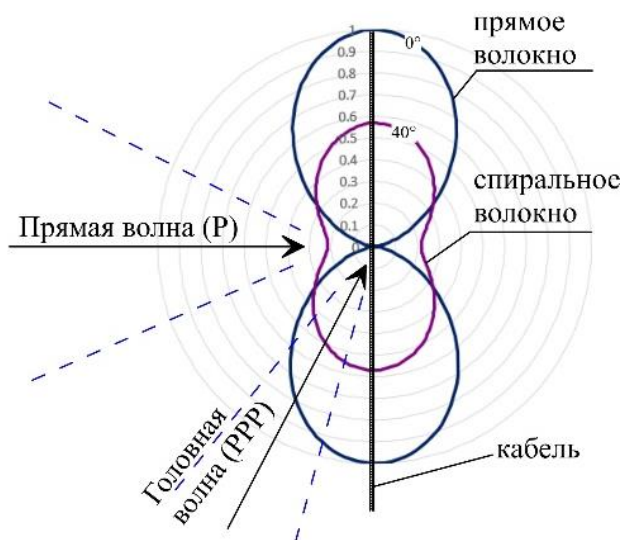


Рисунок 3.23 – Диаграммы направленности кабеля, содержащего прямое (0°) и спиральное волокно (40°) и направления прихода наиболее интенсивных волн.

Для сравнения волновых картин необходимо преобразовать сигнал растяжения волокна, полученный оптоволоконной системой регистрации к традиционному представлению скорости смещения частиц, регистрируемому велосиметрами. Для этого сигнал DAS проинтегрирован по времени и инвертирован.

3.2.2.1. Прямые проходящие волны

На рисунке 3.24 приведено сравнение сейсмограмм, полученных гидрофонами, системой DAS спиральным и прямым волокном в сортировке прямого параллельного просвечивания, когда датчик и приемник располагаются на одной глубине. Сейсмограмма, полученная с помощью системы DAS на спиральном кабеле, позволяет уверенно выделять первые вступления прямой продольной волны, пришедшей по нормали к кабелю. Запись, следующая за первыми вступлениями прямой волны, имеет существенные отличия, по всей видимости, связанные с различными амплитудно-частотными характеристиками систем регистрации. На сейсмограмме с прямого кабеля первые вступления прямой волны фактически не наблюдаются.

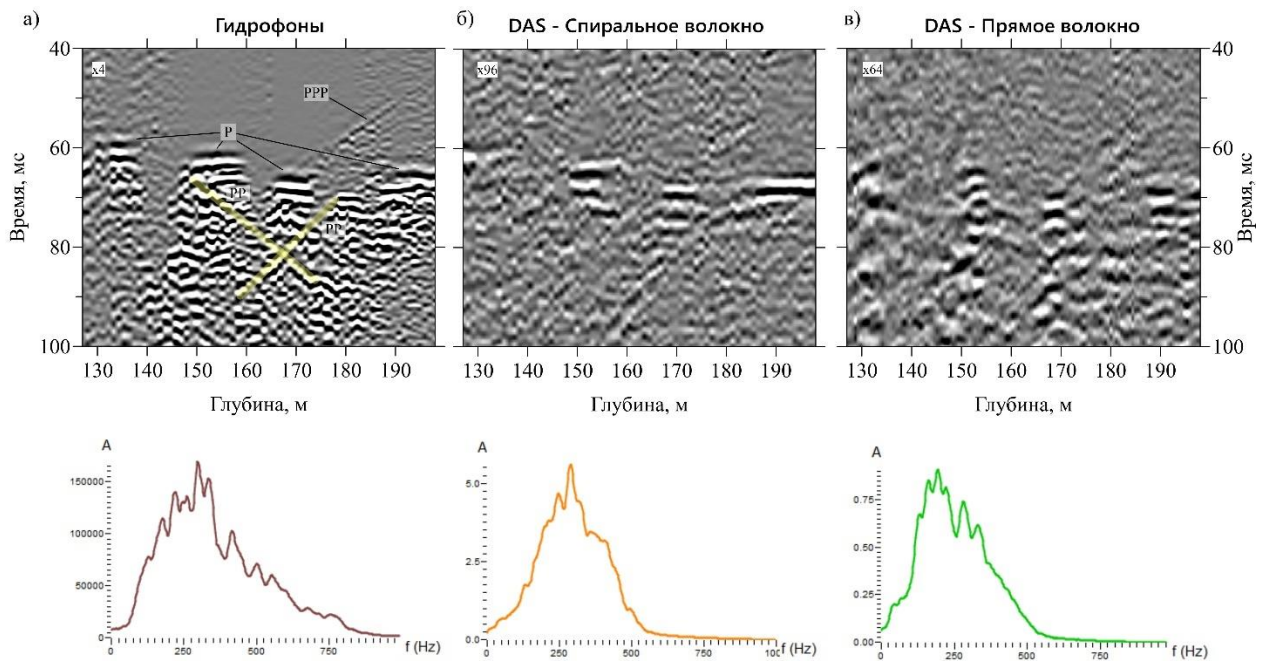


Рисунок 3.24 – Сравнение сейсмограмм и амплитудных спектров прямого параллельного просвечивания, при регистрации с помощью гидрофонов (а) и оптоволоконной системой DAS на спиральном (б) и прямом (в) волокне

Частотный состав сигналов гидрофонов и спирального кабеля в целом весьма близок, максимум спектра совпадает, в то время как для прямого кабеля спектр смещен в область более низких частот.

Также выполнено потрассное сравнение сигналов (рисунок 3.25). Первые вступления прямой волны практически совпадают для гидрофонов и спирального кабеля, в то время как для прямого кабеля корреляция отсутствует. На некоторых участках, в частности на временах 82, 95 мс (рисунок 3.25а) сигнал всех трех систем имеет высокую степень корреляции. На этих временах регистрируются отраженные волны, попадающие в зону высокой чувствительности как спирального, так и прямого волокна. Сравнение сигналов гидрофонов и спирального кабеля на различных глубинах (рисунок 3.25б) дает возможность оценить отклонение времени регистрации первых вступлений, которое составляет не более 0.6 мс (3 дискреты). В последующей записи видно расхождение кривых за счет различного частотного состава.

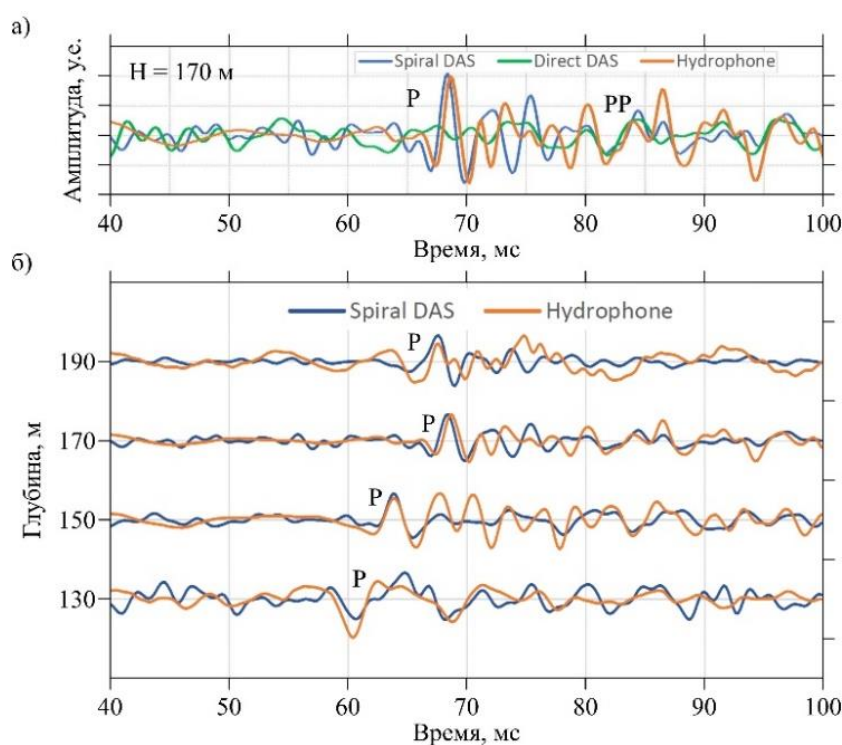


Рисунок 3.25 – Сравнение сейсмотрасс при параллельном просвечивании: а) гидрофонов, спирального и прямого волокна, при глубине источника и приемника 170 м; б) гидрофонов и спирального волокна на различных глубинах

3.2.2.2. Преломленные головные волны

Сравнение головных волн выполнено для суммированных сейсмограмм, позволяющих существенно повысить отношение сигнал/шум поля головных волн по сравнению с однократными сейсмограммами. Используя свойство взаимности источника и приемника, такие суммарные сейсмограммы можно получить как для приемной (рисунки 3.26 а, в, д), так и для излучающей скважины (рисунки 3.26 б, г, е). Кратность суммирования зависит от количества пунктов приема или возбуждения и может составлять до 200 накоплений. Учитывая количество накоплений на одном пункте возбуждения, общая кратность может превышать 1000.

В условиях плоской преломляющей границы (в рассматриваемом примере представленной кровлей солей), головные волны имеют плоский фронт, падающий на приемную линию в скважине под углом $\sim 60^\circ$. При падении головной волны на горизонтальную акустическую границу возникает классический набор проходящих и отраженных продольных (P) и обменных поперечных (S) волн (рисунок 3.26б, схему хода лучей см. на рисунке 2.37). Поскольку регистрация поперечных волн гидрофонами в скважинном флюиде физически невозможна, на стенках скважины происходит еще один обмен из поперечной в продольную волну, что позволяет наблюдать эти волны на сейсмограммах.

Волновые картины, полученные гидрофонами у приемной и излучающей скважин весьма схожи, на них присутствует весь набор отраженных и обменных волн, что легко объяснить сходными диаграммами направленности электроискрового излучателя в скважине и гидрофонов, имеющими максимум чувствительности по нормали к скважине. Диаграмма направленности оптоволоконного кабеля существенно отличается и имеет максимум чувствительности вдоль оси скважины. Этим обуславливается отсутствие волн PPP_1S и PPP_2S на сейсмограммах DAS в приемной скважине.

В то же время при пересортировке к общему пункту приема (рисунки 3.26г, е), волновая картина более похожа на ту, что наблюдается при

использовании гидрофонов. В частности, становятся отчетливо различимы проходящие и отраженные поперечные волны.

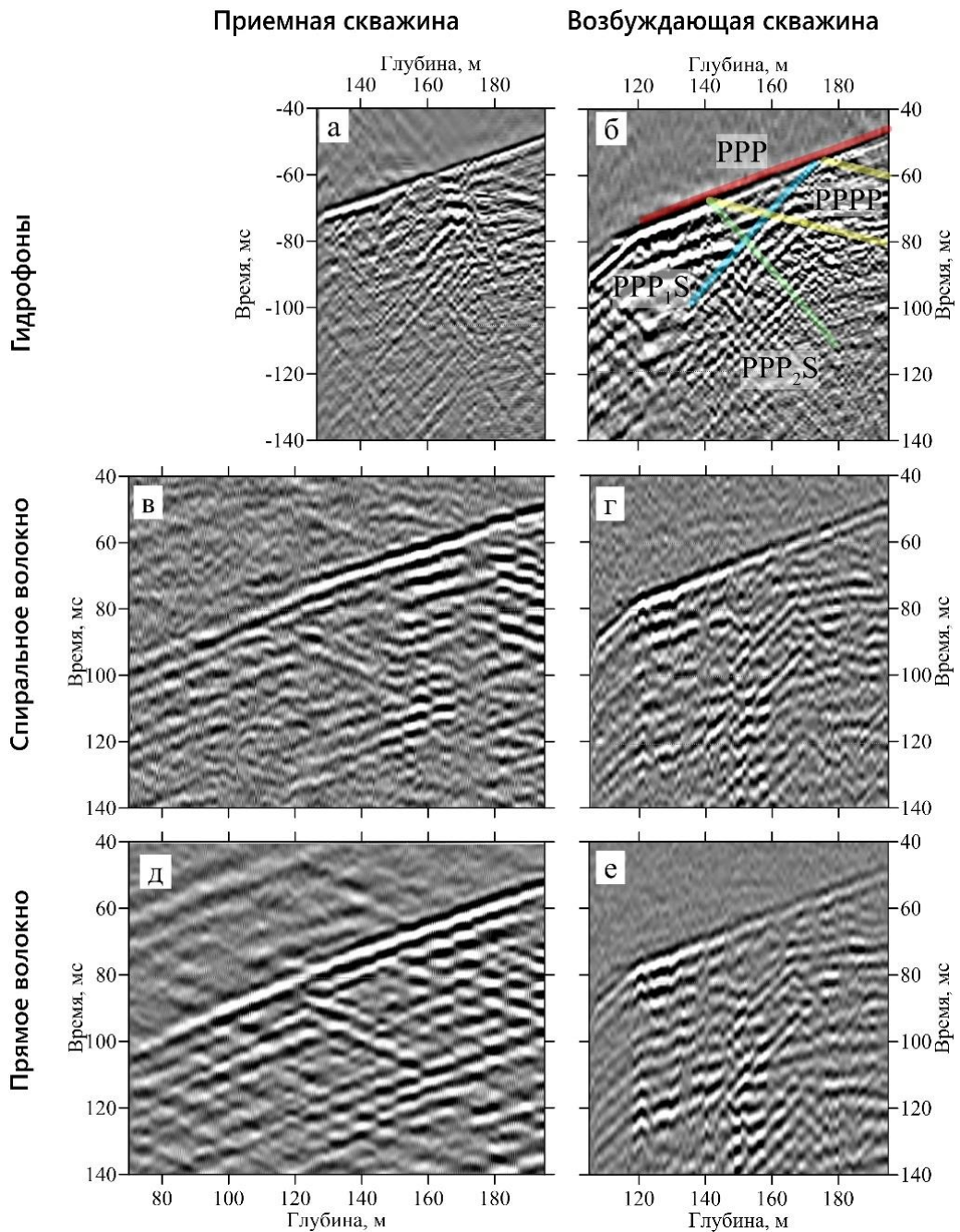


Рисунок 3.26 – Сравнение суммированных сейсмограмм головных волн. а, б – гидрофоны, в, г – спиральный кабель; д, е – прямой кабель. а, в, д – приемная скважина, б, г, е – излучающая скважина. PPP – продольная головная волна, PPPP – продольная головная волна, отраженная от горизонтальной границы, PPP₁S – проходящая обменная головная волна, PPP₂S – отраженно-обменная головная волна.

Таким образом, волновое поле определяется диаграммой направленности как регистрирующей системы, так и излучателя, что позволяет варьировать его состав за счет взаимного расположения линий возбуждения и приема.

Еще одним важным результатом является наличие регистрируемого сигнала за пределами обводненной части скважины (глубины 70-100 м на рисунке 3.26в, д). Факт присутствия сигнала в сухой части скважины можно объяснить высокой кратностью суммирования (более 1000), а также тем, что тяжелый кабель плотно прилегает к стенке под собственным весом, что является достаточным для приема акустического сигнала.

3.2.2.3. Отраженные волны

На сейсмограммах, регистрируемых прямым кабелем при описанной системе наблюдений, в соответствии с представлениями о диаграмме направленности кабеля, практически полностью отсутствует прямая волна, однако присутствует большое количество волн, которые, по всей видимости, относятся к отраженным и преломленным (рисунок 3.27).

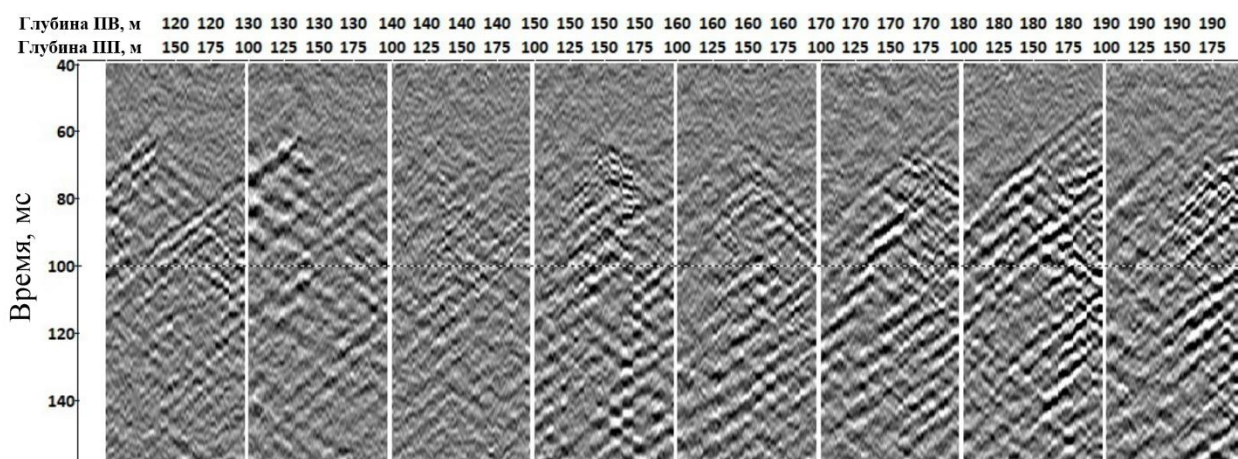


Рисунок 3.27 – Сейсмограммы МСП при регистрации прямым волокном

На основании имеющейся априорной информации о скоростном распределении в плоскости межскважинного просвечивания по данному материалу выполнена лучевая миграция отраженных волн и построение глубинного сейсмического разреза (рисунок 3.28). Полученные результаты согласуются с имеющейся априорной сейсмогеологической информацией. На

глубинном разрезе наиболее интенсивно отображается кровля ПКС на 210 м, и кровля СМТ на 155 м.

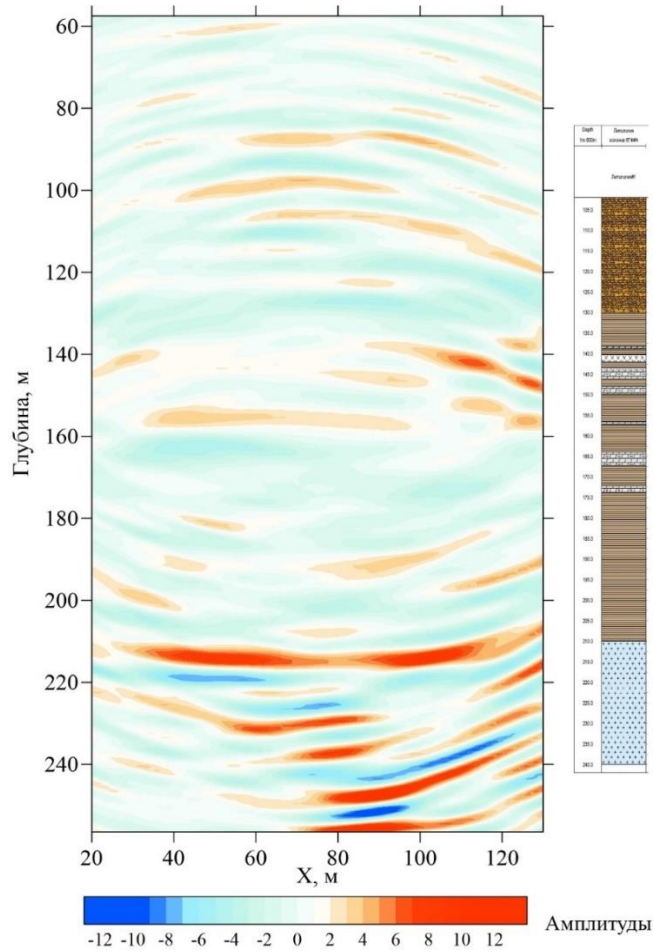


Рисунок 3.28 – Результат миграции отраженных волн при МСП, прямое волокно

3.2.3. Межскважинное просвечивание на малых расстояниях

Изучение возможностей системы DAS продолжено путем выполнения просвечивания на коротком расстоянии между скважинами. Регистрация выполнена системой DAS описанной в разделе 3.2.2, см. рисунок 3.22. Возбуждения осуществлялись в скважине 2-2 электроискровым источником с единичным воздействием 2500 Дж. На каждом пункте возбуждения выполнялось 16 накоплений.

Прием осуществлялся системой DAS одновременно в скважинах 2-1 (кабелем со спиральным и прямым волокном) и 2-2 (кабелем с прямым волокном). Полезная оптическая длина приемной линии составила 1000 м.

Дискретизация по времени 0.2 мс, шаг пунктов приема 0.5 м. База приема 10 м.

Приемный спиральный кабель расположен в "короткой" скважине 2-1, интервал приема 10-130 м, возбуждения проведены в соседней "глубокой" скважине 2-2, интервал возбуждения 105-195 м. Расстояние между скважинами составляет 12 м. Обе скважины обсажены пластиковой колонной ПВХ и заполнены водой до глубины 100 м. Выше 100 м воды нет ни в трубе, ни в затрубном пространстве. Схема наблюдений приведена на рисунке 3.29. Сейсмограммы общего пункта возбуждения представлены на рисунке 3.30, общего пункта приема – на рисунке 3.31.

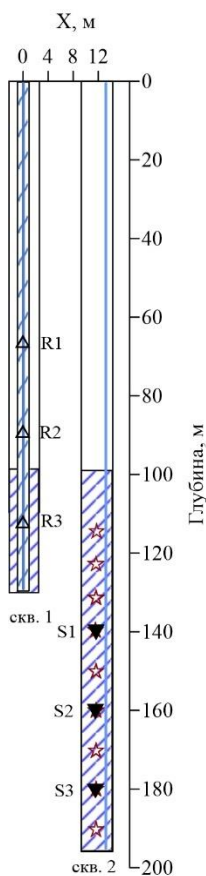


Рисунок 3.29 – Схема наблюдения при межскважинном просвечивании на коротком расстоянии.

Первые вступления регистрируются как в обводненной, так и в сухой части скважины. На больших удалениях более интенсивный сигнал регистрируется прямым волокном. При параллельном просвечивании (прямая

волна падает перпендикулярно на кабель), сигнал присутствует только на спиральном волокне (рисунок 3.31, пункт приема R3).

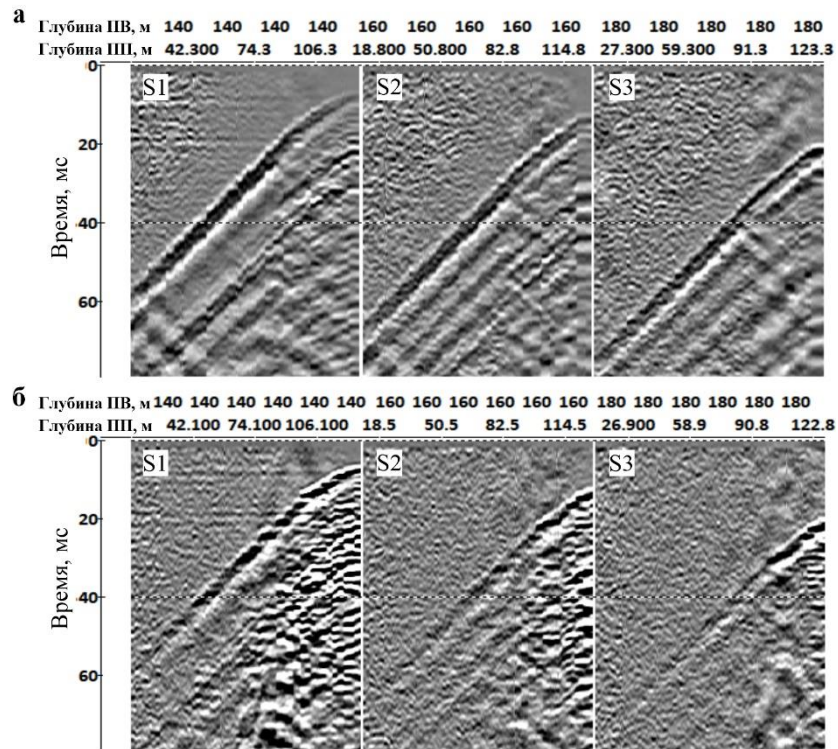


Рисунок 3.30 – Сейсмограммы общего пункта возбуждения межскважинного просвечивания в скважинах 2-1 и 2-2. Прием прямым (а) и спиральным (б) кабелем.

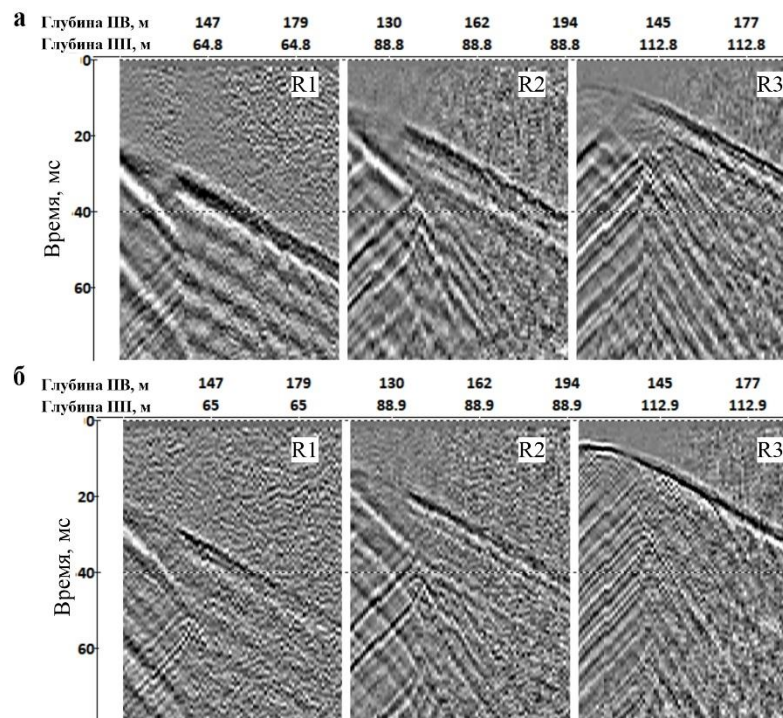


Рисунок 3.31 – Сейсмограммы общего пункта приема межскважинного просвечивания в скважинах 2-1 и 2-2. Прием прямым (а) и спиральным (б) кабелем.

Полученные результаты позволяют сделать заключение, что на малых расстояниях между скважинами (10-20 м) система DAS уверенно регистрирует сейсмоакустические сигналы и может быть использована как при межскважинном просвечивании, так и при продольном ВСП. При этом спиральный кабель осуществляет регистрацию при любых углах падения, в то время как на сейсмограммах с прямого кабеля корреляция первых вступлений возможна при углах больших 45° - то есть при выносах не менее расстояния между скважинами.

Факт присутствия сигнала в сухой части скважины можно объяснить тем, что достаточно тяжелый кабель плотно прилегает к стенкам скважины, что является достаточным для приема акустического сигнала.

3.2.4. Количественная оценка чувствительности оптоволоконных распределенных датчиков на основании данных межскважинного просвечивания

На основании сравнения записей оптоволоконной системы регистрации и поверенных стандартных сейсмических датчиков можно получить количественную оценку чувствительности оптоволоконной системы путем сравнения отношений сигнал-шум для каждого способа регистрации.

Сравнение двух типов датчиков выполнено по методике межскважинного просвечивания. Регистрация оптоволоконной системой выполнена регистратором ВОСК-А, производства компании ООО «Петрофайбер» [Alekseev, 2014] в трех вариантах базы измерения: 5, 7.5, 10 м. В каждом варианте оценивались характеристики волновой картины как прямого, так и со спирального волокна. В той же паре скважин выполнена съемка с помощью традиционных гидрофонных пьезокерамических датчиков, чувствительность которых составляет -197 дБ относительно 1 В на 1 мкПа, с последующим усилением сигнала на 6 дБ до передачи на поверхность.

Межскважинное просвечивание выполнено с полным лучевым покрытием в целевом интервале глубин. Параметры системы наблюдения для

гидрофонов и оптоволоконной системы регистрации приведены в таблице 3.2. Сейсмограммы прямого параллельного просвечивания, зарегистрированные гидрофонами, прямым и спиральным волокном представлены на рисунке 3.32. Частотный состав регистрируемого полезного сигнала находится в пределах 100-700 Гц.

Таблица 3.2 – Параметры системы наблюдения

	Гидрофоны	ВОСК-А	
Тип волокна	-	Прямое	Спиральное
Шаг пунктов приема, м	1	1	0.75
Длина записи, мс	300		
Шаг дискретизации по времени, мс	0.2		
Интервал возбуждения, м	115-195		
Интервал приема, м	127-198	100-198	
Количество накоплений	4	16	
Количество пунктов приема для одного физического пункта возбуждения	24	3002	
Общее количество трасс в наборе, ед	5832	8019	10500

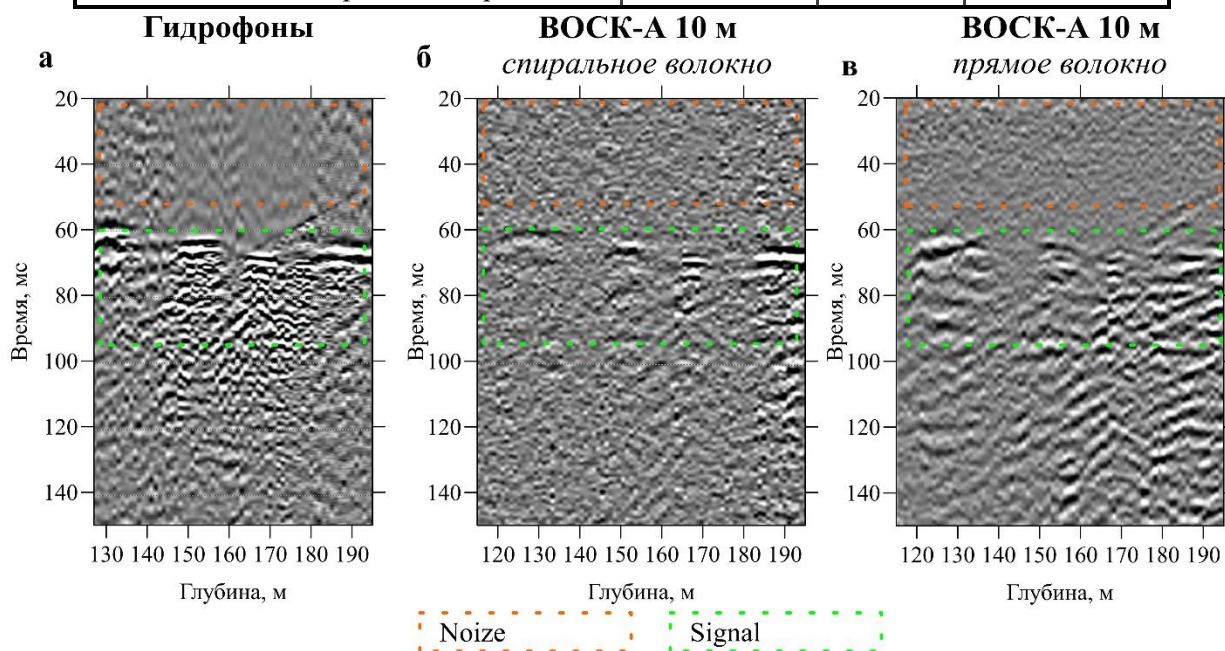


Рисунок 3.32 – Сейсмограммы параллельного просвечивания, зарегистрированные гидрофонами (а) и оптоволоконной системой ВОСК-А со спиральным (б) и прямым (в) волокном

По каждому набору данных для всех трасс рассчитана энергия шума N , определяемая как сумма квадратов амплитуд в интервале времени 40 мс до первых вступлений и энергия полезного сигнала S в интервале 40 мс начиная

со времени первых вступлений. Структура шума для двух типов датчиков отличается. Гидрофоны регистрируют низкочастотный шум в интервале глубин выше 150 м, в то время как для оптоволоконных датчиков шум в целом равномерно распределен по всему интервалу приема. Очевидно, это связано с разными физическими принципами регистрации. Гидрофоны регистрируют изменение всестороннего давления в жидкой среде, в то время как оптоволоконные датчики реагируют на изменение длины волокна.

Следующим шагом выполнен расчет отношения сигнал-шум $R_{SN}=(S-N)/N$ по всем наборам данных. Распределения R_{SN} от глубины источника и приемника для каждого набора данных приведены на рисунке 3.33.

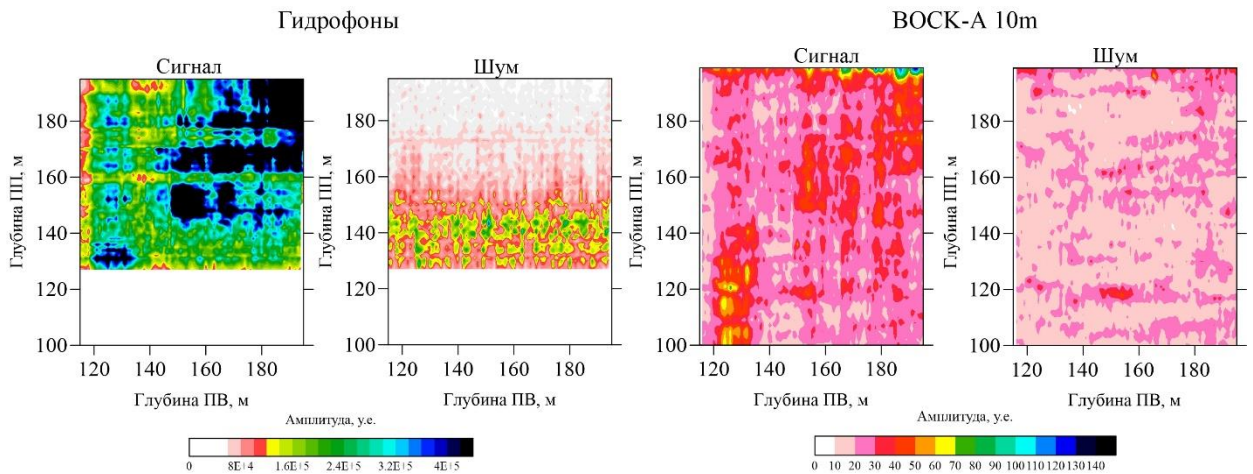


Рисунок 3.33 – Распределения сигнала (а,в) и шума (б,г) гидрофонов (а,б) и оптоволоконных датчиков (в,г).

Для спирального волокна энергия сигнала ожидаемо меньше, поскольку чувствительность распределяется по трем пространственным осям, однако, как видно из рисунка 3.32, первые вступления прямой волны, падающей под прямым углом, имеют большую амплитуду чем аналогичные данные с прямого волокна, что хорошо согласуется с теоретическим представлением о диаграммах направленности кабеля с прямым и спиральным волокном [Kuvshinov, 2016; Чугаев, Тарантин, 2023]. Отношение R_{SN} гидрофонов растет с глубиной, что связано с уменьшением микросейсмического шума на более глубоких участках записи.

Чтобы сравнить значения параметра R_{SN} для различных наборов данных найдены отношения R_{FO}/R_H , где R_{FO} и R_H – значения отношений сигнал-шум, соответственно, оптоволоконной системы регистрации (FO – fiber optic) и гидрофонов (H). Такие отношения были рассчитаны для трех выборок, ограниченных интервалами приема: 127-200 м, 150-200 м и 175-200 м исходя из соображений, что с глубиной уровень акустического шума в скважине уменьшается (рисунок 3.34).

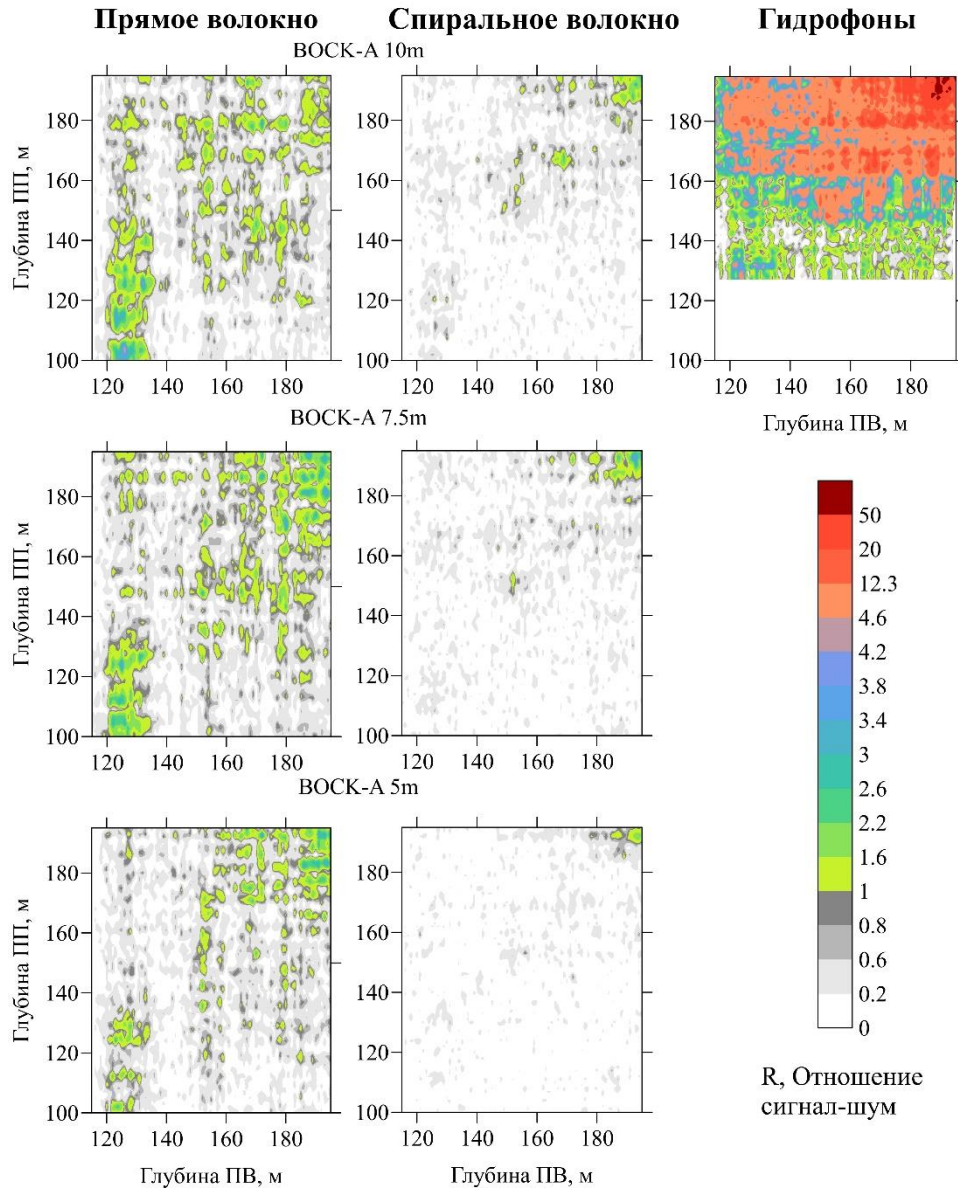


Рисунок 3.34 – Распределения отношения сигнал-шум от глубины источника и приемника для оптоволоконной системы регистрации и гидрофонов

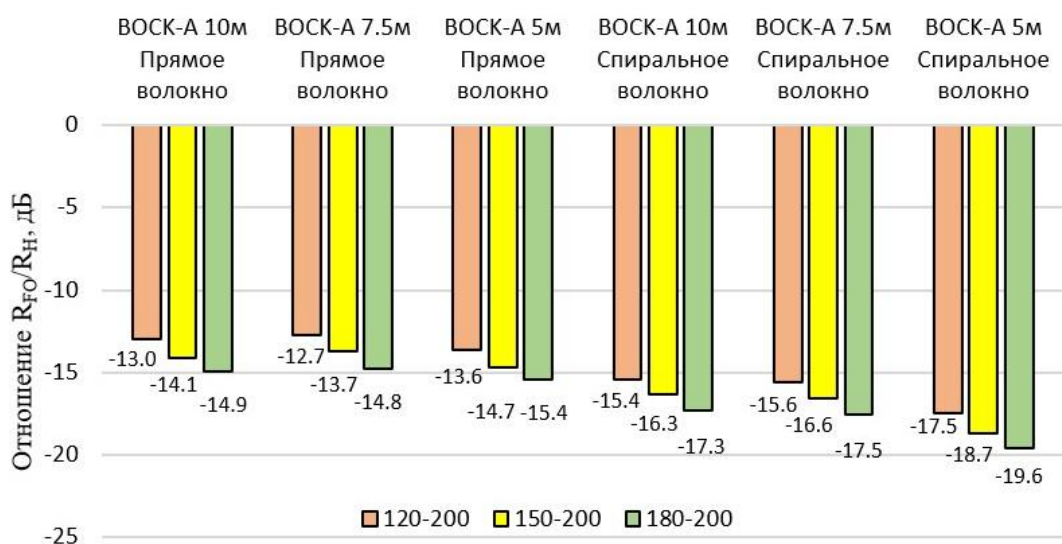


Рисунок 3.35 – Сравнение энергий оптоволоконной системы регистрации и гидрофонов при различной базе приема и интервале глубин

При расчете учтено влияние количества накоплений на одном пункте возбуждения на значение R_{SN} для разных наборов. В качестве результата выбраны медианные значения полученных наборов отношений (рисунок 3.35).

На гистограммах прослеживается уменьшение относительной чувствительности оптоволоконных датчиков с увеличением глубины и снижением акустического шума. По всей видимости это связано с составом регистрируемого шума гидрофонными и оптоволоконными датчиками. Гидрофоны регистрируют только микросейсмический шум, присутствующий в скважине, в то время как записи оптоволоконных датчиков дополнительно осложнены оптическим шумом. Соотношение уровня оптического и акустического шума в итоговом отношении влияет на значение R_{FO}/R_H , уменьшая его вместе с уменьшением акустического шума.

Для прямого волокна наблюдается нелинейная зависимость чувствительности с уменьшением базы измерения, в то время как для спирального волокна уменьшение чувствительности практически прямо пропорционально уменьшению базы измерения. Это связано с нелинейным амплитудно-частотным откликом прямого волокна, тогда как для спирального амплитудно-частотный отклик более ровный.

Полученные результаты дают возможность количественно оценить чувствительность оптоволоконных систем регистрации, что существенно при проектировании сейсмоакустических систем наблюдения на их основе. Для рассмотренной оптоволоконной системы регистрации ВОСК-А чувствительность прямого волокна составляет (-13 .. -15) дБ и (-15 .. -17) дБ для спирального волокна относительно гидрофонов.

Выводы по главе 3

Внедрение системы оптоволоконных акустических датчиков расширяет возможности методических решений при проведении скважинных сейсмических исследований за счет одновременной регистрации прямых, преломленных головных и отраженных волн по всей длине во всех приемных скважинах.

Получена аналитическая зависимость амплитудно-частотной характеристики оптоволоконной системы с применением спирального волокна, которая зависит от нескольких ключевых факторов: интегрирования измеряемого значения вдоль волокна на базе приема, угла падения волны на кабель и угла намотки волокна в кабеле. Показано, что увеличение угла намотки повышает равномерность амплитудно-частотной характеристики продольных волн как по частотам, так и по углам падения. Спиральная намотка меняет эффективную базу измерения сигнала, что позволяет путем суммирования сигналов прямого и спирального волокна за счет перекрытия спектров выполнять регистрацию частот, подавляемых при отдельной регистрации.

Предложена конструкция кабеля для регистрации широкополосных сейсмоакустических сигналов, с помощью которых можно выполнять сейморазведочные исследования и решать обширный круг горнотехнических и инженерных задач.

Оптоволоконная система регистрации имеет чувствительность намного ниже, чем у традиционных сейсмоакустических датчиков, тем не менее она

обеспечивает высокую повторяемость регулярного полезного сигнала, что позволяет повысить его интенсивность за счет многократного суммирования.

Интенсивность сигнала при регистрации системой DAS существенно ниже, чем при использовании гидрофонов, тем не менее первые вступления достаточно уверенно коррелируются и могут быть прослежены. Это позволяет проводить межскважинное просвечивание массива для оценки скоростной характеристики способом межскважинной томографии на прямых волнах.

При регистрации прямых продольных волн кабелем с прямым волокном корреляция практически отсутствует. Одновременно с этим на сейсмограммах присутствуют отраженные волны. С помощью алгоритма миграции отраженных волн, зарегистрированных прямым волокном, построен глубинный сейсмический разрез в межскважинном пространстве согласующийся с априорным сейсмогеологическим представлением о разрезе.

Интенсивность головных волн на спиральном волокне ниже, чем на прямом, однако частотный состав шире за счет более широкой АЧХ спирального кабеля. Как для прямого, так и для спирального кабеля суммирование головных волн позволяет регистрировать достаточно четкие вступления головной волны в сухой части скважины и использовать его для определения скоростей продольных волн околоскважинного массива даже в сухих скважинах.

На малых расстояниях между скважинами (10-20м) система DAS уверенно регистрирует сейсмоакустические сигналы. При этом спиральный кабель осуществляет регистрацию при любых углах падения, в то время как на сейсмограммах с прямого кабеля корреляция первых вступлений возможна при углах больших 45° - то есть при вертикальных выносах не менее расстояния между скважинами.

Глава 4. Практика применения скважинной сейсморазведки на месторождениях полезных ископаемых

Объекты исследования сейсмическими методами на месторождениях водорастворимых полезных ископаемых можно разделить на несколько основных групп.

К первой и наиболее сложной группе объектов относятся территории, связанные с аварийными участками шахтных полей. Прорыв пресных поверхностных вод в шахтные выработки приводит к образованию сквозной карстовой полости от уровня выработок до поверхности земли, с последующим растворением междукамерных целиков на уровне продуктивного горизонта [Барях, 2009]. Связанный с этим комплекс техногенно-геологических процессов, происходящих вокруг провала в условиях промышленной и городской застройки, требует непрерывного контроля состояния породного массива и инженерно-активной зоны.

Ко второй группе относятся территории, испытывающие повышенную нагрузку вследствие подработки с возникающими оседаниями земной поверхности. В данном случае сейсморазведочные исследования применяются в качестве источника параметрического обеспечения для геомеханических расчетов прогноза состояния ВЗТ, а также решают задачу детального изучения состояния породного массива соляной и надсоляной толщи.

Третья группа включает горнотехнические объекты, главными из которых являются шахтные стволы. Шахтный ствол пересекает толщу пород от поверхности до продуктивных отложений, которая включает водоносные горизонты, что является наибольшей проблемой при разработке месторождения солей. Для исключения возможности проникновения пресных вод в пространство строящегося ствола необходимо обеспечить надежную гидроизоляцию. Для месторождений солей практически безальтернативным является способ искусственного замораживания горных пород. Проектная толщина ледопородного ограждения определяется на основании литологии и

физико-механических свойств конкретного интервала разреза. В процессе проходки регламентом предусмотрен контроль состояния и толщины ледопородного ограждения. Для этого применяются разные сейсмоакустические методы в комплексе с данными непрерывных термометрических измерений.

Помимо трех основных групп объектов существуют и другие варианты применения скважинных сейсмических методик, не обязательно относящиеся непосредственно к месторождению, в частности, шахтные скважинные исследования, изучение оснований зданий и сооружений и т.д. В текущей главе представлены наиболее показательные примеры применения скважинных сейсморазведочных исследований.

4.1. Скважинный мониторинг аварийного участка шахтного поля Верхнекамского месторождения солей

За всю историю промышленной разработки соляных месторождений насчитывается несколько десятков аварий, произошедших в результате проникновения пресных грунтовых вод в выработанное пространство с последующим образованием провалов или оседания земной поверхности [Шокин, 1969; Шиман, 1992; Барях, 2009]. Поэтому ключевой задачей при разработке соляных месторождений для предотвращения подобных явлений является обеспечение сохранности так называемой водозащитной толщи (ВЗТ). Верхняя часть ВЗТ представлена покровной каменной солью и грунтовые воды непосредственно над этой толщей представляют собой насыщенные рассолы хлорида натрия. Для контроля и прогноза состояния ВЗТ применяются маркшейдерские наблюдения и выполняется геомеханическое моделирование, входной информацией для которого являются параметры системы разработки, а также сведения о физико-механических свойствах подрабатываемого массива [Барях, Самоделкина, 2017]. В условиях активного развития природно-техногенных процессов на подработанной территории для

получения актуальной информации о физико-механических свойствах массива важную роль играют сейсмические методы [Барях и др., 2017].

Одним из объектов является аварийный участок Верхнекамского месторождения на территории рудника СКРУ-2. В 1995 на этом участке произошло массовое разрушение междукамерных целиков на площади 600х600 м сопровождавшееся землетрясением 4 балла и мгновенным оседанием земной поверхности до 4 метров [Девятков, 2019]. Прорыва грунтовых вод в шахту при этом не произошло. После этого события на участке организован сейсмогеомеханический мониторинг.

В 2014 г. по данным мониторинга отмечены негативные изменения в состоянии ВЗТ в юго-восточной краевой части зоны обрушения. 18 ноября непосредственно над опасной зоной сформировался провал диаметром около 30–40 м. До образования провала мониторинг выполнялся ежегодно и включал только наземные малоглубинные сейсмические исследования, с 2014 года интервал наблюдений сократился до трех месяцев, а по некоторым профильным линиям выполняется ежемесячно.

По результатам наземных исследований выбран наиболее проблемный участок, на котором выполнено бурение скважин для проведения сейсмических мониторинговых наблюдений, направленных на изучение процессов, происходящих в надсоляной толще. Основными задачами скважинного мониторинга являются параметрическое обеспечение наземных сейсмических исследований, построение геолого-геофизических моделей массива, а также мониторинг изменений, происходящих на участке.

4.1.1. Описание системы наблюдений

В районе исследований пробурено 6 скважин, с глубиной забоя 196-200 м (рисунок 4.1) при глубине залегания кровли ПКС 210-215 м. Минимальное расстояние между скважинами – 100 м. В скважинах ежегодно проводится полный комплекс скважинных исследований, включающий вертикальное

сейсмопрофилирование, межскважинное просвечивание, скважинное профилирование ОГТ, акустический и сейсмический каротаж.

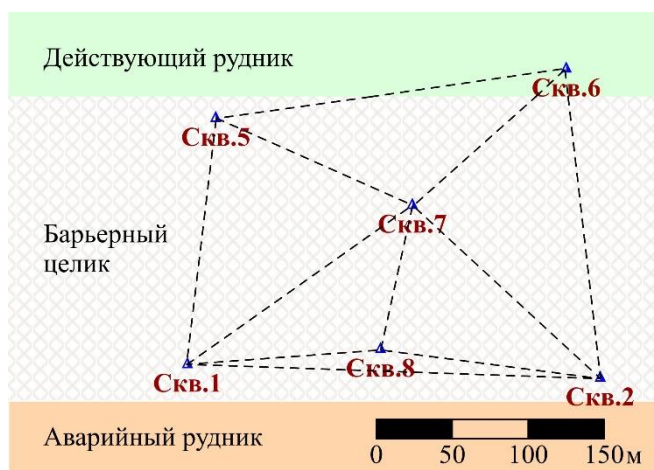


Рисунок 4.1 – Схема расположения скважин на аварийном участке и линий межскважинного просвечивания

В условиях принудительного осушения территории наиболее информативным методом является межскважинное просвечивание. В то же время большая территория наблюдений и редкая сеть скважин ставят определенные задачи по выявлению изменений в массиве сейсмическими методами.

Для решения поставленных задач на первом этапе выполнено изучение скоростной модели массива путем совместного анализа данных вертикального сейсмопрофилирования и межскважинного просвечивания, в том числе анализа головных волн. Далее, имея представление о скоростной модели объекта реализовано получение сейсмических изображений, основанное на акустической контрастности горизонтальных границ естественной слоистости, так и субвертикальных акустических границ, связанных с техногенной нарушенностью массива.

4.1.2. Получение скоростной модели объекта

4.1.2.1. Трехсторонняя томография

Классическим способом получения скоростной характеристики при межскважинном просвечивании является сейсмотомография, как правило, совмещающая межскважинное просвечивание и вертикальное

сейсмопрофилирование. Для условий рассматриваемого объекта система наблюдений не является в полной мере трехсторонней, поскольку скважины задействованы только на глубинах ниже уровня грунтовых вод, однако, это, тем не менее, позволяет получить скоростную оценку в межскважинном пространстве. В связи с особенностями системы наблюдений и неравномерностью лучевого покрытия, в верхней части разреза (до глубин 100 м) скоростная характеристика имеет более интегральную оценку (рисунок 4.2).

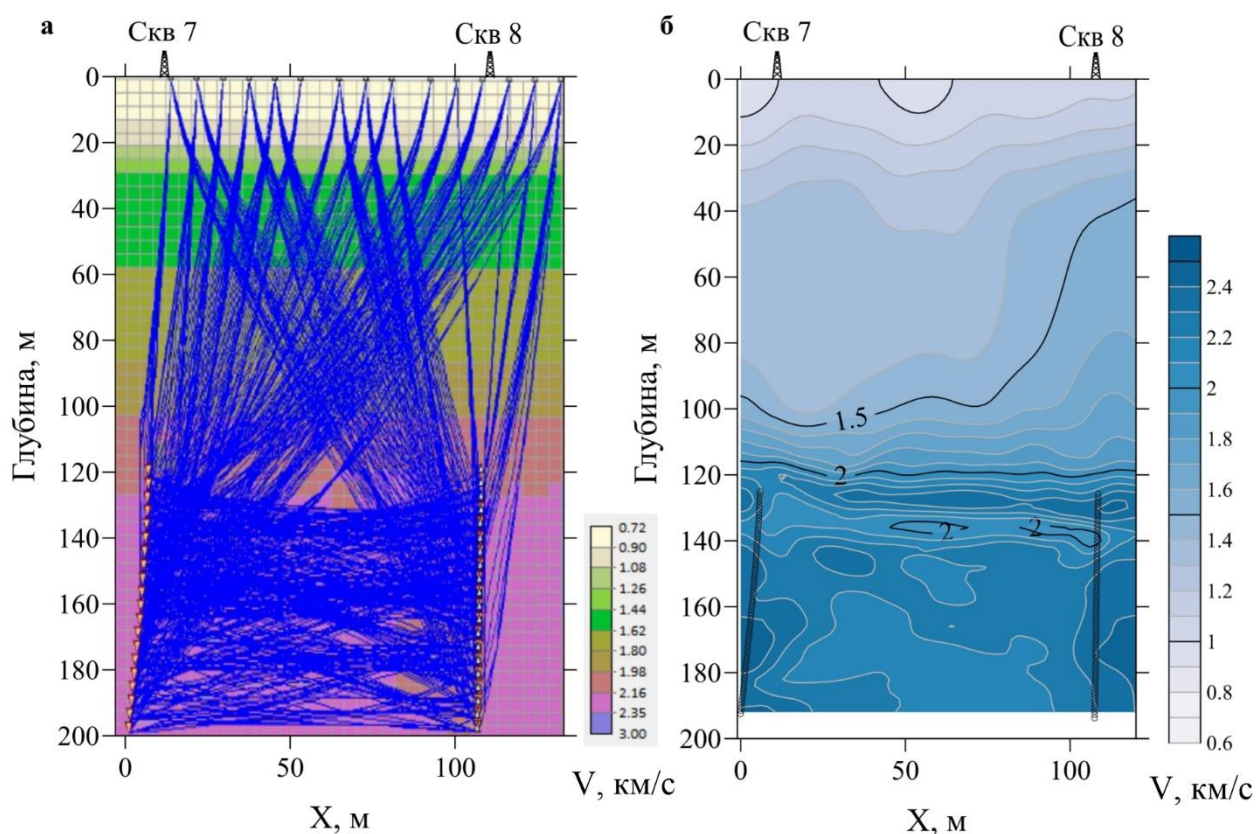


Рисунок 4.2 – Получение скоростной характеристики массива с помощью сейсмической томографии в плоскости межскважинного просвечивания. (а) – лучевое покрытие, (б) – распределение скоростей продольных волн по результатам сейсмотомографии

Построение скоростных разрезов по всем плоскостям межскважинных просвечиваний дает возможность получить объемное представление о распределении скоростей на изучаемом участке и строить площадные и объемные распределения скоростей путем интерполяции (рисунок 4.3).

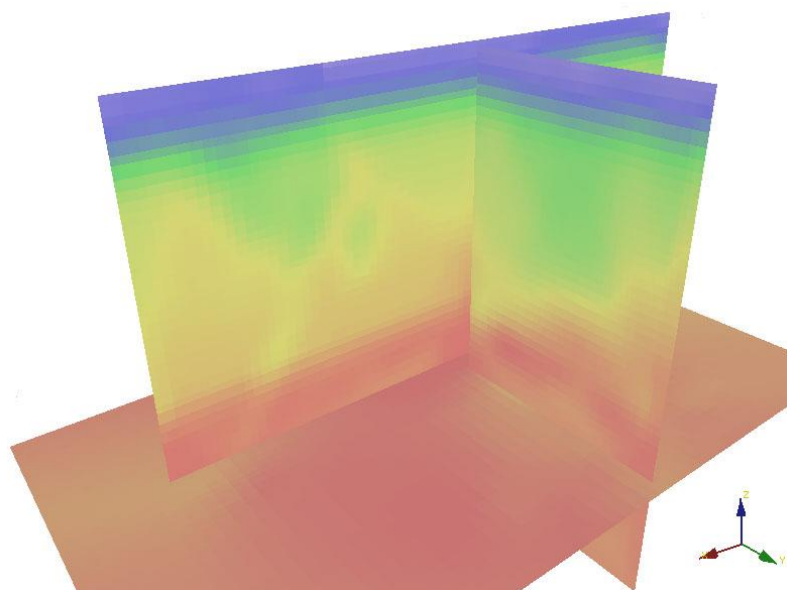


Рисунок 4.3 – Объемное представление распределения скоростей

4.1.2.2. Уточнение скоростной модели по данным головных волн

Изучение годографа головных волн (рисунок 4.4) по методике, описанной в разделе 2.2.1, выражение 2.13 позволяет получить скоростной разрез $V_1(h)$ вдоль скважины на основании зависимости от кажущейся скорости $V_R(h)$:

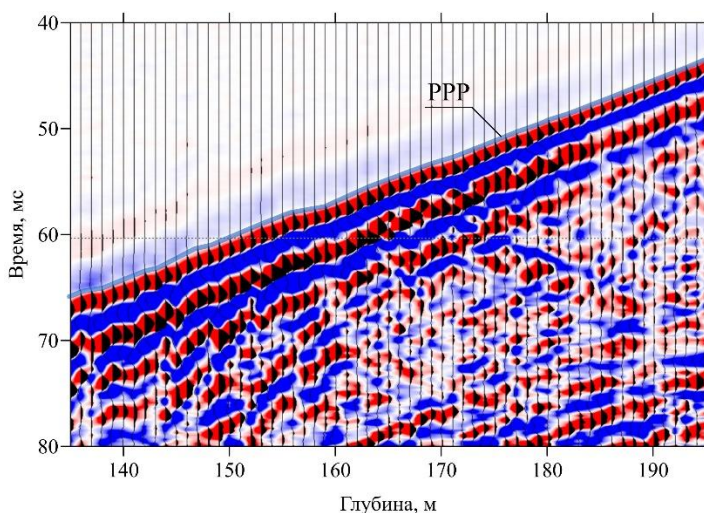


Рисунок 4.4 – Сейсмограмма, содержащая головную волну, с выделенным годографом

Полученные скоростные кривые с детальной выделением пропластков 2-3 м можно использовать в качестве априорных данных для построения скоростного разреза между скважинами путем интерполяции. В пластовой модели используя первые вступления головных волн можно визуализировать

результаты путем решения прямой и обратной задачи и используя алгоритмы томографии (рисунок 4.5). При этом надо понимать, что центральная часть не имеет лучевого покрытия и не может считаться достоверной.

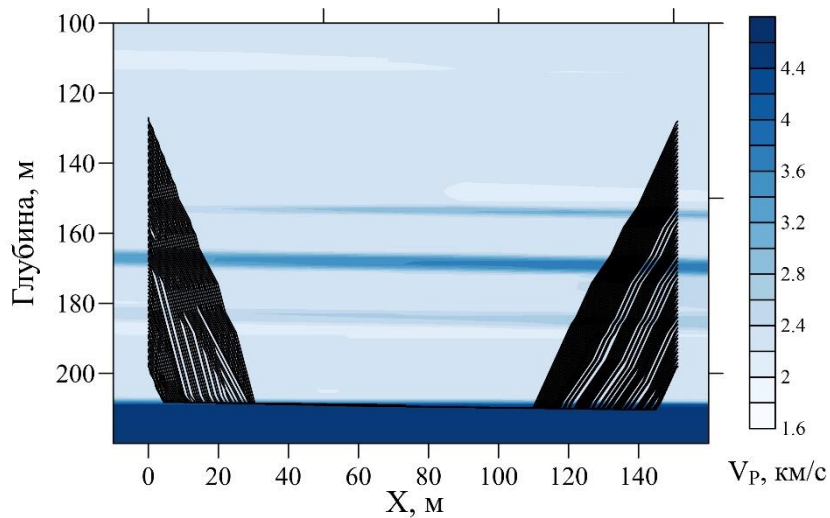


Рисунок 4.5 – Скоростная модель по данным головных волн при наблюдениях МСП и схема хода лучей.

4.1.3. Получение сейсмических изображений объекта

4.1.3.1. Глубинный разрез в надсолевой части

На основании скоростной модели среды можно переходить к получению сейсмических изображений на основе миграции отраженных волн, регистрируемых при межскважинном просвечивании. На рисунке 4.6 результат миграции отраженных волн совмещен со скоростной характеристикой. На разрезе наблюдаются зоны нарушения осей синфазности и существенное изменение динамики, которое интерпретируется как вертикальная зона дезинтеграции массива (синий пунктир). На это же изображение нанесены субвертикальные акустические границы, выделенные с помощью головных волн, зарегистрированных на поверхности при проведении продольного ВСП.

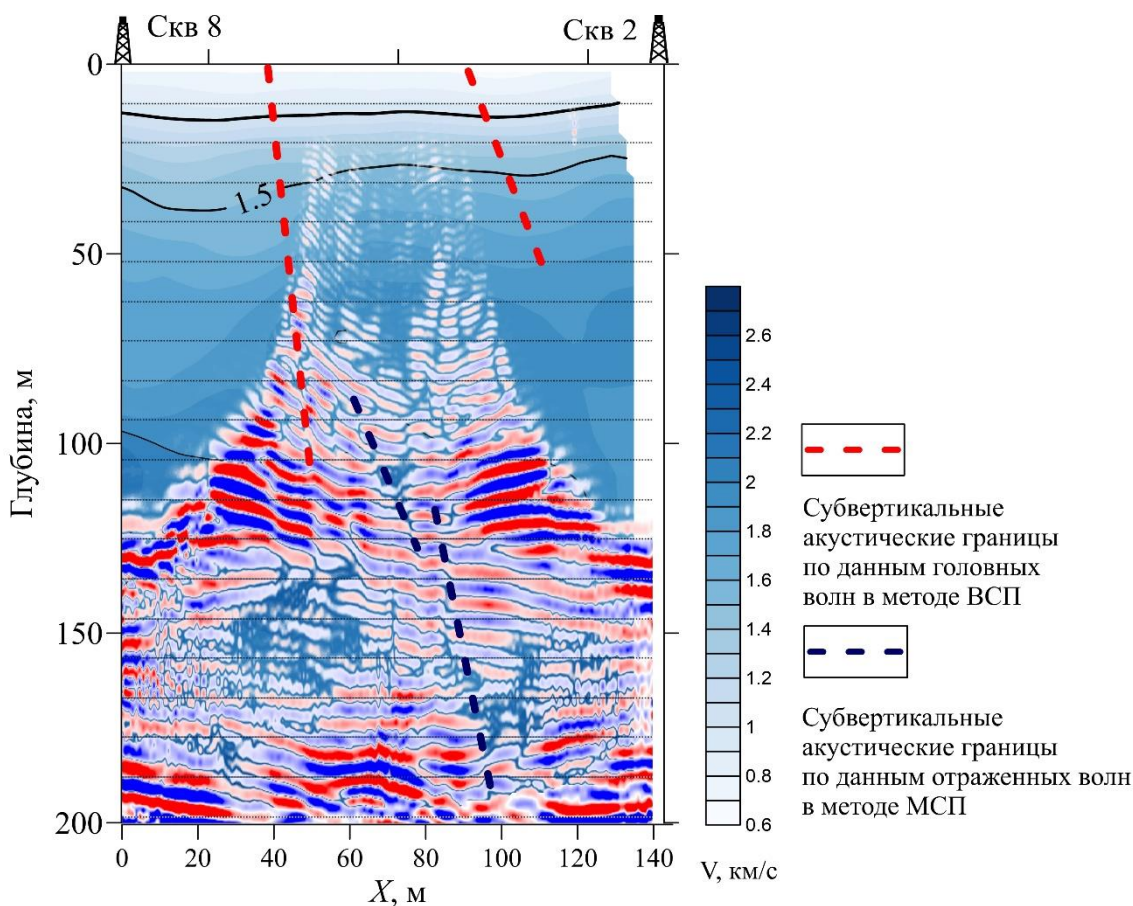


Рисунок 4.6 – Результат интерпретации глубинного разреза по данным отраженных волн в методе межскважинного просвечивания

Еще один пример миграции отраженных волн при проведении МСП приведен на рисунке 4.7. Здесь же для сравнения проведены результаты наземных сейсмических исследований (рисунок 4.7а). Можно отметить явное пространственное совпадение особенностей на приведенных изображениях. В частности, аномалия, выделенная желтым цветом, наклонная ось синфазности на глубинах 180-200 м, кровля солей на глубине 210 м. При этом частотный состав скважинного разреза отраженных волн намного шире, видимая длина волны на разрезе порядка 3-5 метров. Горизонтальная разрешающая способность оценивалась по результатам моделирования объема Френеля (см. табл. 2.2) и составляет в данном случае 10-15 м, что существенно меньше, чем для наземных исследований, при которых длина волны на разрезе составляет 15-20 м, а половина диаметра зоны Френеля для изучаемых глубин оценивается как 40-50 м.

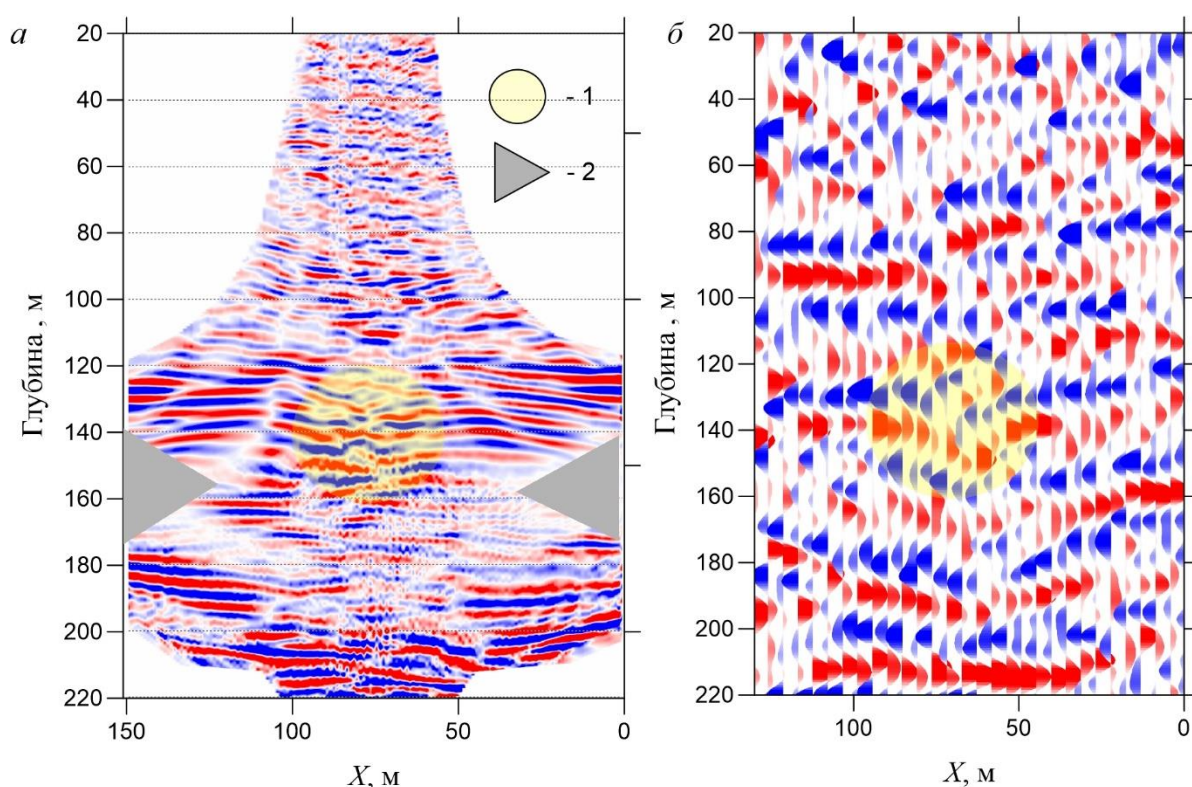


Рисунок 4.7 – Результирующий глубинный сейсмический разрез по данным межскважинного просвечивания (а) и разрез по наземным данным на том же участке (б). 1 – аномалия волнового поля, 2 – зона тени.

Данный пример показывает, что соотношение расстояния между скважинами и длиной расстановки приема/возбуждения критически влияет на освещенность разреза отраженными волнами. В приведенном примере расстояние между скважинами составляет 150 м, длина приемной линии по вертикали 70 м. При такой геометрии системы наблюдений, в середине интервала результирующего разреза (в окрестности глубины 160 м) по краям изображения присутствуют зоны тени, где сигнал обнулен в процессе миграции в связи с ограничением максимальных углов отражения. Кроме того, изучение структурного поведения границ ниже кровли соляной толщи ограничено интерференцией во временной области с прямой волной.

4.1.3.2. Сейсмический разрез ниже кровли соли

При расстояниях между скважинами более 200 м отражения из солевой толщи приходят раньше прямой волны за счет высокой скорости в солях (см. выражение 2.5). Несмотря на относительно слабый сигнал, отсутствие

интерференции и система многократных наблюдений позволяют получать высокоразрешающий разрез на узком участке в центральной части между скважинами ниже забоя скважин (рисунок 4.8). На глубине 257 м отбивается первый в разрезе карналлитовый пласт, что совпадает с априорной геологической информацией. Надо отметить, что тонкие прослои карналлита (0,3-0,6 м) появляются раньше, на глубине 225 и 240 метров, но при длине волны зондирующего сигнала 7-10 м на результирующем глубинном сейсмическом разрезе они практически не различимы.

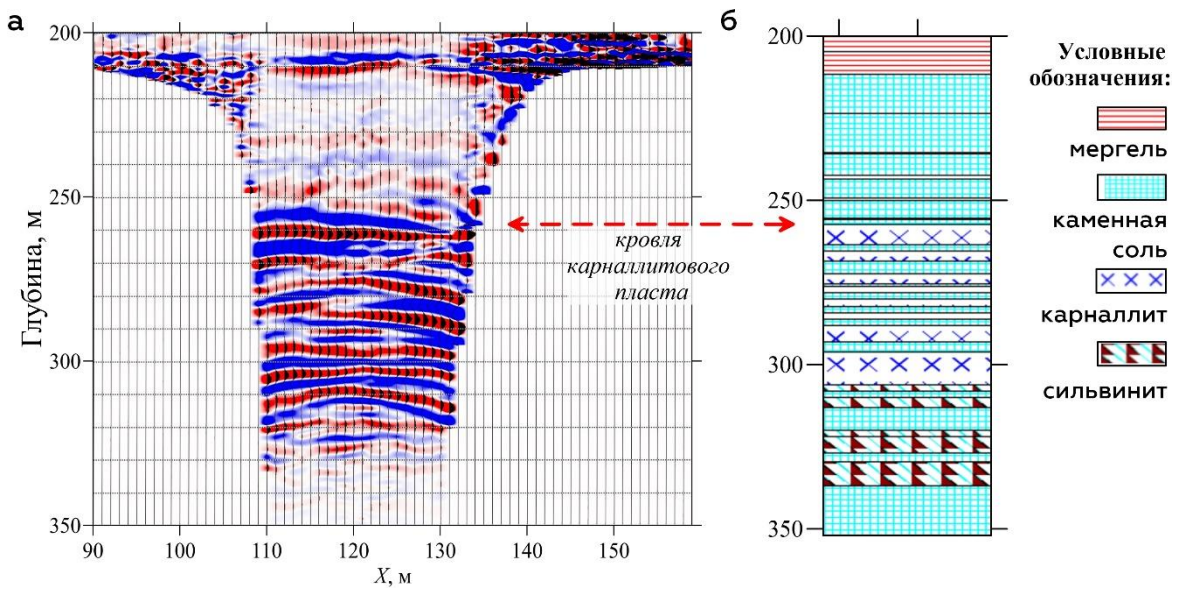


Рисунок 4.8 – Сопоставление глубинного сейсмического разреза по данным обработки отраженных волн в методе МСП ниже забоя скважин (а) и геологической колонки по априорным данным (б). Расстояние между скважинами 240 м

Лучевое моделирование позволяет проиллюстрировать, что в случае горизонтальных границ такой подход не позволяет картировать границы по латерали, однако его можно рассматривать как инструмент высокочастотного зондирования массива ниже забоя скважин.

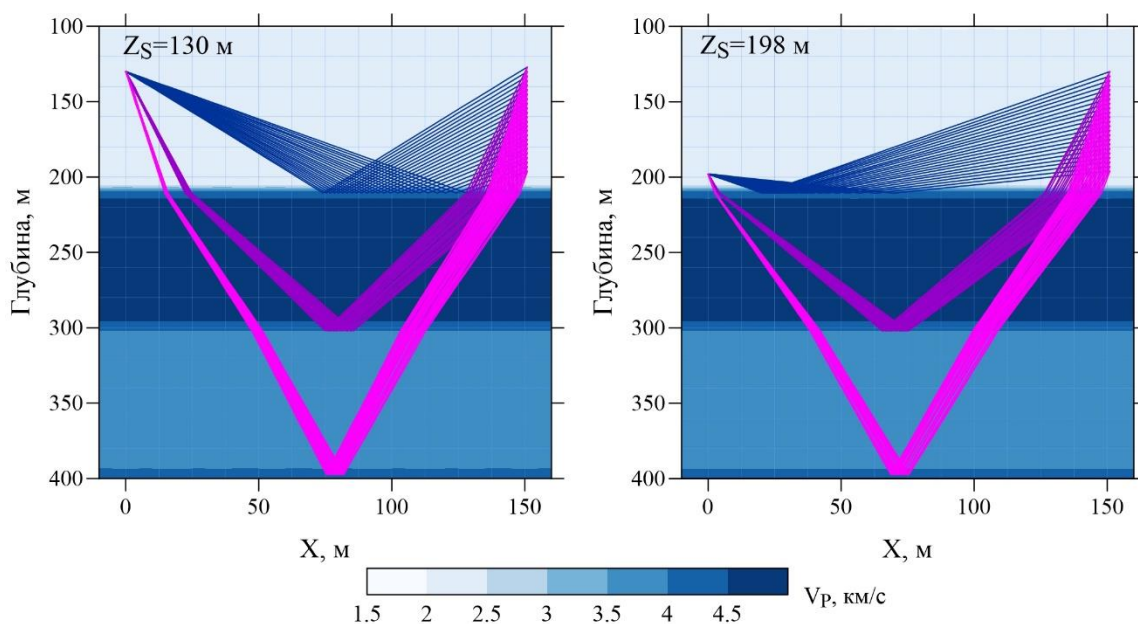


Рисунок 4.9 – Лучевое моделирование отраженных волн от горизонтов ниже кровли соли

4.1.4. Мониторинговые наблюдения

Сейсмические исследования в скважинах характеризуются высокой степенью повторяемости результатов. Этому способствует низкий уровень шума на удалении от земной поверхности, отсутствие сезонных вариаций, а также проведение исследований одним комплектом оборудования. Кабель скважинной косы и электроискровой излучатель размечены глубинными метками, что позволяет точно позиционировать источник и приемники в скважинах. Точность установки глубины составляет ± 10 см, что составляет $\pm 0.05\%$ от расстояния между скважинами. Следовательно, геометрический фактор практически исключает внесение погрешностей в регистрируемое волновое поле. Точность синхронизации излучателя со станцией составляет ± 0.008 мс, что составляет $\pm 0.01\%$ времени регистрации прямой волны и меньше шага дискретизации. Таким образом, аппаратное влияние на волновое поле и его изменение составляет менее 0.1% , что позволяет утверждать, что изменение волнового поля является результатом только изменения физико-механического состояния массива.

На рисунках 4.10, 4.11 приведены сравнения волновых полей по просвечиваниям, которые были выполнены в 2020 и 2021 годах. Волновые поля выведены с одинаковым амплитудным усилением, выполнен полностью идентичный препроцессинг данных (полосовая фильтрация 20-40-1000-2000 Гц).

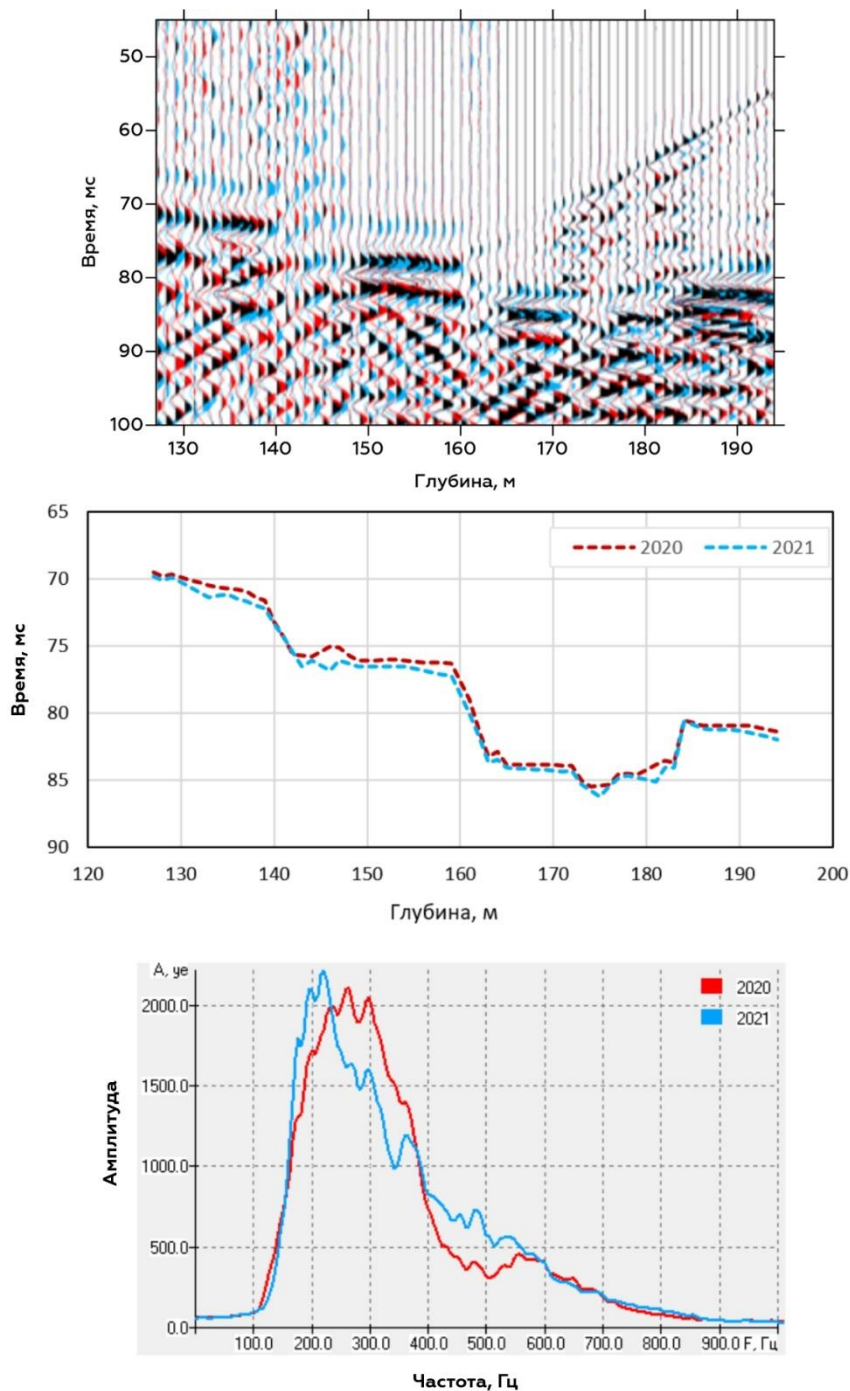


Рисунок 4.10 – Сравнение результатов межскважинного просвечивания скв. 7-скв. 2. (а) волновые поля, (б) время первых вступлений прямой волны, (в) амплитудные спектры.

Визуализация волновых полей выполнена способом цветовой мультипликации. Данные 2020 года отрисованы красным цветом, 2021 – синим. Их пересечение дает черный цвет. Более раннее вступление красного цвета говорит об уменьшении скорости прохождения волн, и, опосредованно, ухудшения физико-механических свойств среды. Более раннее вступление синего цвета говорит об увеличении скоростей и повышении значений физико-механических характеристик.

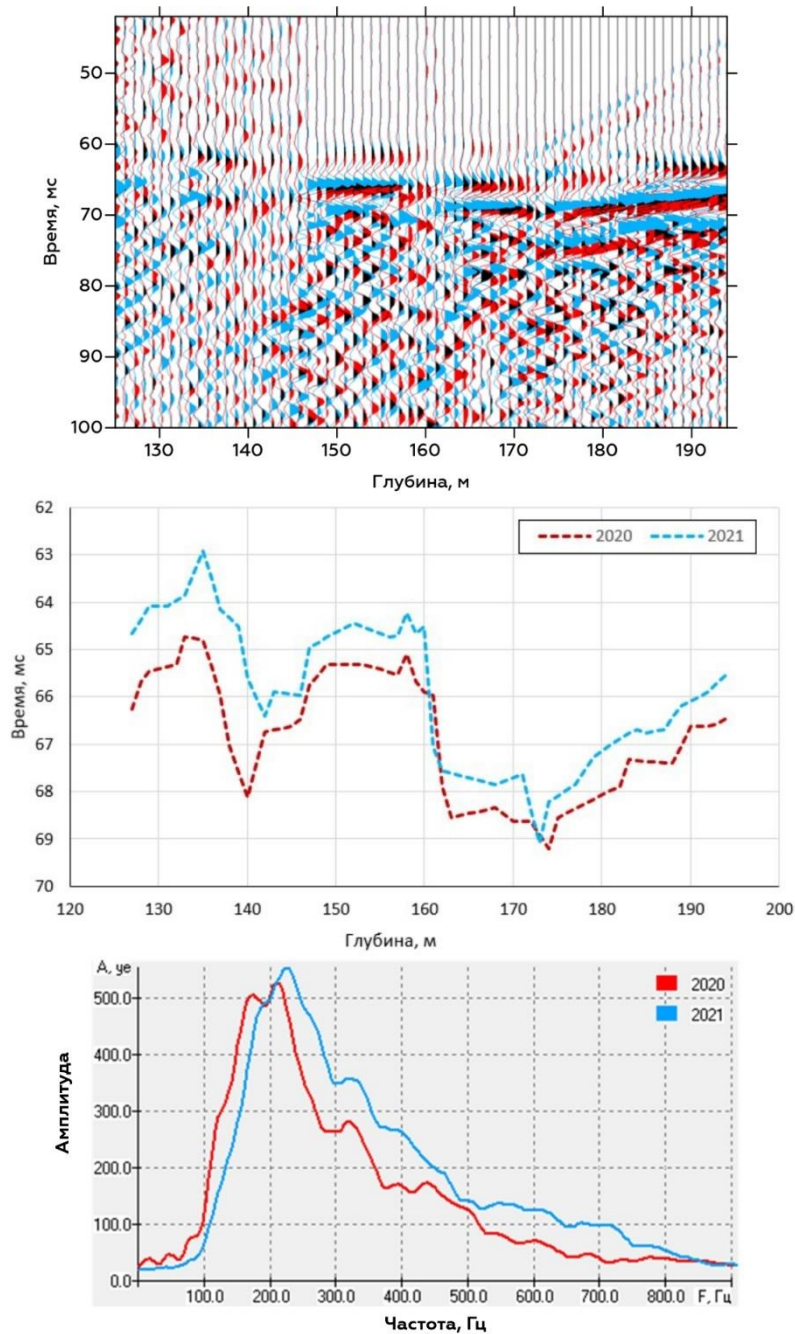


Рисунок 4.11 – Сравнение результатов межквартирного просвечивания скв.8 – скв. 2. (а) волновые поля, (б) амплитудные спектры.

Просвечивание скв.7 - скв.2 характеризуется стабильностью регистрируемого сигнала, как по времени, так и по амплитуде. На просвечивании скв. 8 - скв. 2 изменение времени прихода прямой волны достигает почти половины фазы колебаний, кроме того, заметно усилились высокочастотная часть спектра. Эти эффекты, по всей видимости, наблюдаются благодаря закачке тампонирующих растворов с целью консолидации массива.

4.1.4. Скважинный мониторинг породного массива с применением распределенных оптоволоконных акустических датчиков

Преимущества оптоволоконной системы регистрации создают предпосылки ее применения для мониторинга ответственных объектов Верхнекамского месторождения солей. Во-первых, большая площадь, на которых происходят негативные техногенно-геологические процессы, требуют достаточно протяженных линий наблюдений, что обуславливает экономическую эффективность DAS. Во-вторых, ряд объектов находятся в потенциально аварийных зонах, с полным или частичным ограничением доступа, что обуславливает целесообразность применения в качестве чувствительного элемента оптоволоконного кабеля, не требующего технического обслуживания. В-третьих, стоимость даже специального кабеля на порядок меньше стандартных геофонов или гидрофонов, что существенно снижает потенциальные потери в случае аварии на исследуемом участке.

4.1.4.1. Описание системы мониторинга

Реализованная система мониторинга представляет собой 4 приемных водонаполненных скважины глубиной 200 м, и одну возбуждающую (рисунок 4.12). Приемные скважины оборудованы специальным оптоволоконным кабелем, содержащим прямое и спиральное волокно, и связаны в единую оптоволоконную линию, позволяющую выполнять наблюдения одновременно по всей длине всех скважин. По каждой скважине оптический сигнал проходит 4 раза – 2 раза по прямому волокну и 2 раза по спиральному. Регистрация

выполняется одним опрашивающим устройством Silixa iDAS v2, параметры системы регистрации приведены в таблице 4.1.

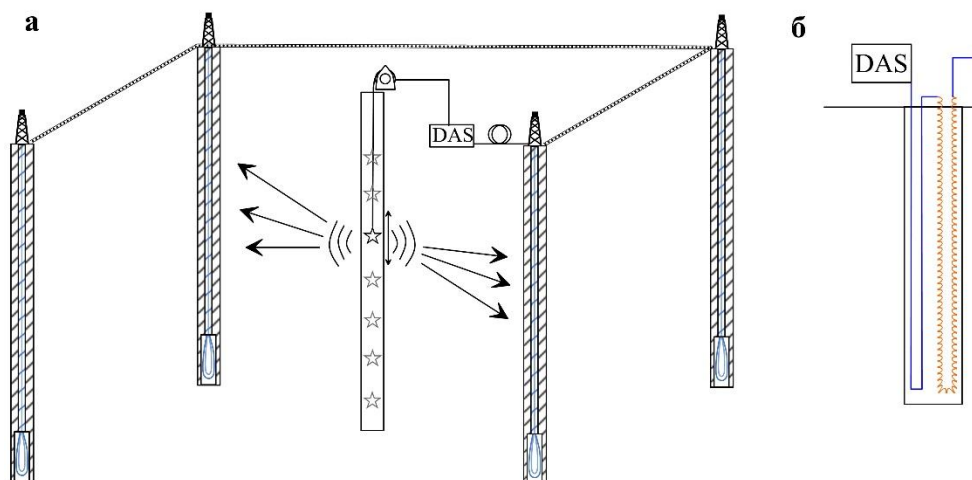


Рисунок 4.12 – а - Схема возбуждения и регистрации сигнала в скважинах; б – схема подключения волокна в одной скважине

Таблица 4.1 – Параметры системы наблюдения

Общая оптическая длина приемной линии	6300 м
Суммарная длина полезных участков приемной линии	3100 м
Шаг пунктов приема	0.5 м
Количество полезных регистрирующих каналов в скважинах	6200 ед
Общее оптическое затухание на линии	3.5 dB
База приема (Gauge length)	10 м
Длина записи	300 мс
Шаг дискретизации по времени	0.2 мс

Оптоволоконный кабель Wellsense размещенный в скважинах разработан специально для данной системы и произведен на кабельном заводе «Инкаб». Спиральное волокно в кабеле намотано под углом 40° к оси кабеля, таким образом для спирального волокна эффективная база приема в 1.31 раза меньше и составляет ~ 7.5 м. Кабель размещен свободно внутри пластиковой обсадной трубы. Скважины заложены как вертикальные, но реальное измеренное отклонение от вертикали составляет от 2° до 6° , такого угла достаточно, чтобы кабель под собственным весом плотно прилегал к стенкам скважины.

Возбуждающая скважина расположена в центре между приемными, возбуждения производятся электроискровым источником типа «Спаркер» с энергией единичного возбуждения 2500 Дж, который перемещается вдоль всей длины возбуждающей скважины с постоянным шагом 1 м. На каждом пункте возбуждения выполняется 16 накоплений. Накопитель энергии подает импульс синхронизации на регистратор для начала опроса.

Межскважинное просвечивание, проведенное на данном участке ранее, дает представление о составе волнового поля. Преобладает в волновом поле прямая продольная волна с центроидом спектра в районе 300 Гц, кроме того, присутствуют отраженные и преломленные волны. При возбуждении колебаний в нижней части скважины первые вступления представлены преломленной волной более высокой частоты (частоты 300-700 Гц, максимум спектра 500 Гц), чем для прямой волны.

Описанное в пп. 4.2.1, 4.2.2 сравнение сигналов, зарегистрированных гидрофонами и оптоволоконной системой регистрации, дает совпадение времен вступления прямой волны и формы регистрируемого акустического сигнала на уровне ± 0.4 мс, что составляет менее 1% и вполне приемлемо для проведения геофизических наблюдений, однако отношение сигнал/шум для оптоволоконной системы значительно ниже, в результате низкоамплитудное вторичное поле, в частности отраженные и преломленные волны на исходных сейсмограммах практически неразличимы.

Основная идея мониторинга заключается в сравнении времен первых вступлений прямой и головной волны по каждой скважине для двух последовательных измерений и для текущего измерения и референсного начального значения. Для прямой волны сравнение выполняется по линии равных удалений при нулевом вертикальном смещении (прямое параллельное просвечивание), для преломленной головной волны рассчитываются годографы общего пункта возбуждения (ОПВ) и общего пункта приема (ОПП), по которым оцениваются скорости вдоль ствола, соответственно, приемной и возбуждающей скважины. Изменение времени регистрации

указанных волн будут означать изменения физико-механических свойств массива. Локализация изменений возможна по глубине и положению регистрирующей скважины. В будущем, с набором статистической информации возможен переход к анализу амплитуд регистрируемых волн.

4.1.4.2. Результаты мониторинга

Наблюдения с помощью оптоволоконной системы проведены дважды: в сентябре 2022 и в июне 2023 года. На рисунке 4.13 приведено сравнение сейсмограмм по линии равных удалений, по схеме параллельного просвечивания и выполненные в той же паре скважин наблюдения с помощью гидрофонов.

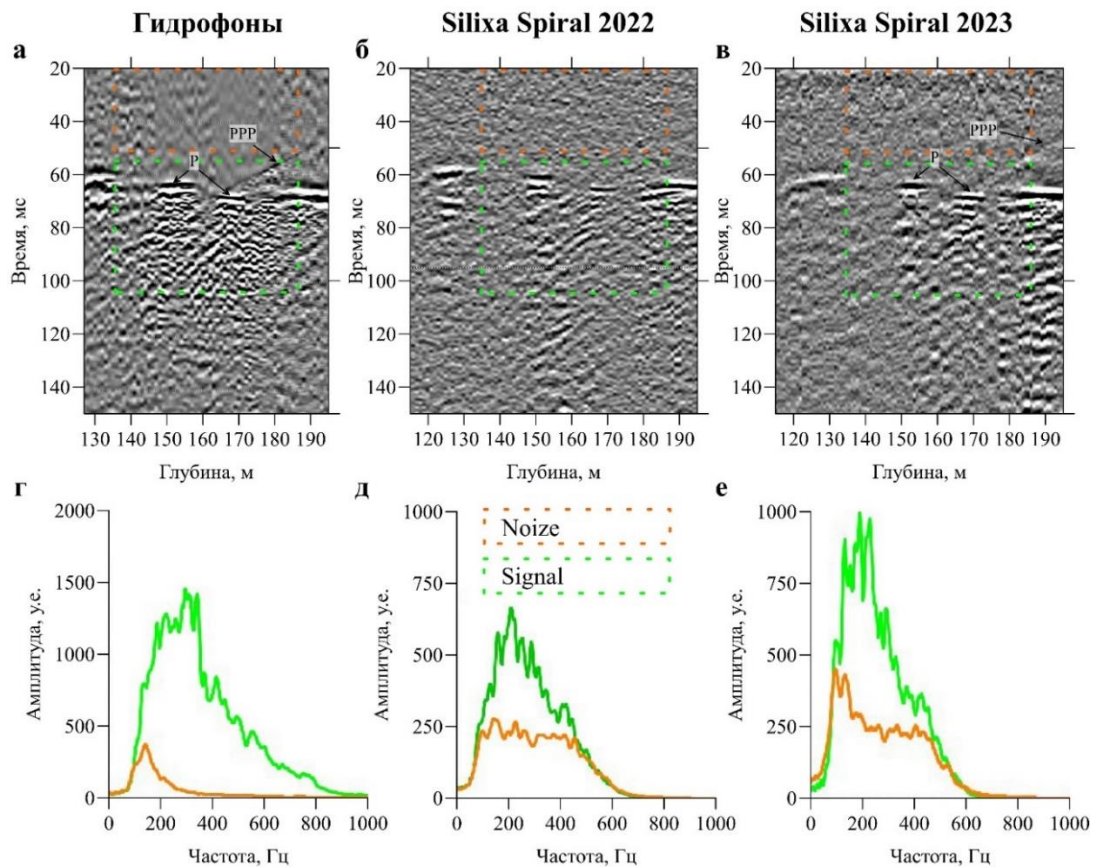


Рисунок 4.13 – Сейсмограммы, зарегистрированные гидрофонами (а) и оптоволоконной системой в 2022(б) и 2023(в) годах, а также их спектры (г,д,е).

P – прямая волна, PPP – переломленная головная волна.

Проведенные в 2023 году мероприятия по оптимизации оптоволоконной линии и снижению потерь оптического сигнала привели к улучшению качества регистрируемого акустического сигнала, что видно на амплитудно-

частотных спектрах сигнала и фонового шума. В частности, на необработанных сейсмограммах в 2023 году отчетливо различим годограф головной волны. Сравнения волновых картин методом наложения и цветовой мультипликации представлено на рисунке 4.14. Сравнение волновых картин прямой волны (рисунок 4.14а) дает незначительные отклонения. В то время как для головных волн (рисунок 4.14б) наблюдаются отклонения времени регистрации до четверти длины волны. Скоростные колонки, построенные по результатам обработки первых вступлений головных волн (рисунок 4.15) указывают на уменьшение скоростей продольных волн в интервале глубин 145-160 м вблизи одной из приемных скважин на 250-300 м/с, что является значимым изменением и может означать уменьшение несущей способности породного массива в данном интервале глубин.

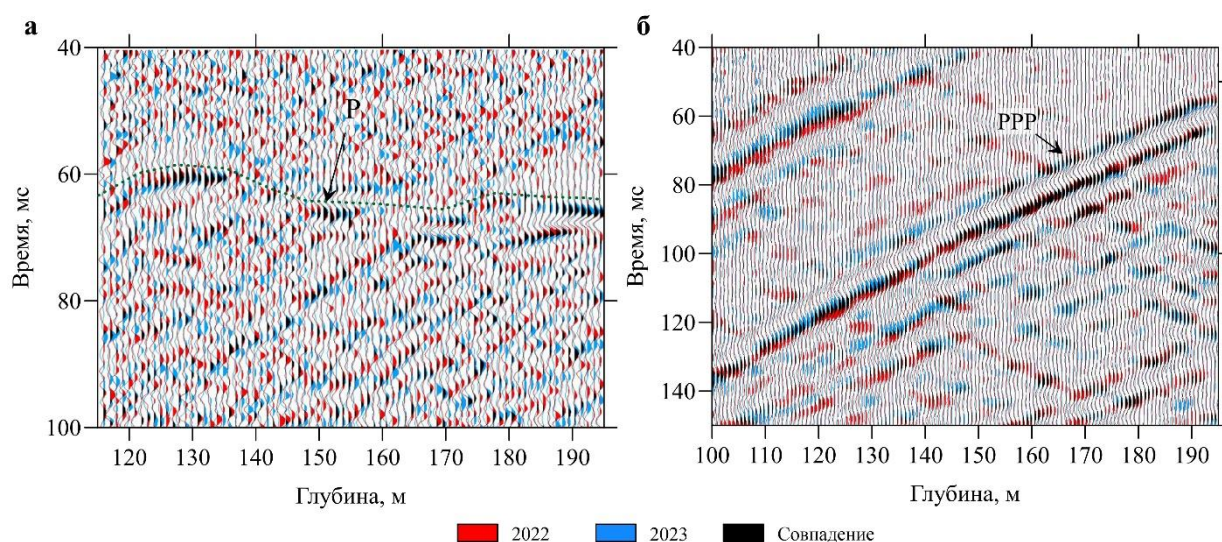


Рисунок 4.14 – Сравнения волновых картин прямой волны (а) и головной волны (б)

Реализованная система мониторинга аварийного участка на Верхнекамском месторождении солей включает распределенную оптоволоконную систему регистрации, смонтированную в 4-х кустах скважинах и активный скважинный источник упругих колебаний. Мониторинг выполняется способом межскважинного акустического просвечивания. Применение специального кабеля, содержащего прямое и спиральное волокно, позволяет регистрировать прямые и преломленные головные волны. На основании сравнения волновых полей локализуются

участки изменения упругих свойств массива и дается количественная оценка таких изменений.

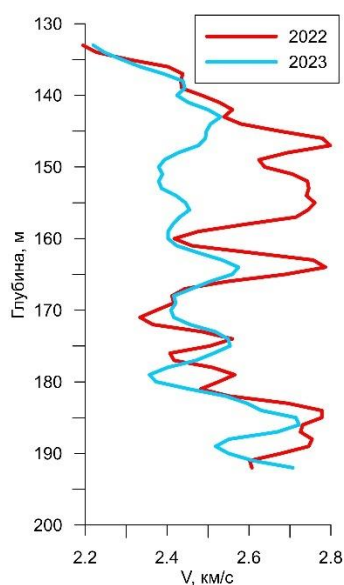


Рисунок 4.15 – Сравнение скоростей продольных волн в околоскважинном пространстве на основании изучения головных волн

Основным преимуществом системы распределенной оптоволоконной акустической системы является возможность использования большого количества одновременно регистрирующих каналов, что позволяет добиваться необходимой пространственной разрешенности, в зависимости от решаемых задач. Низкая стоимость оптоволоконного кабеля позволяет проектировать его перманентное заложение на аварийных участках с ограниченным режимом доступа.

Предложенная система мониторинга может быть использована как для контроля сохранности разрабатываемого массива на проблемных участках, так и для мониторинга оснований ответственных зданий и сооружений, расположенных в зонах ускоренных оседаний подработанной территории.

4.2. Малоглубинные скважинные сейсмические наблюдения в зонах ускоренных оседаний

Зоны ускоренных оседаний являются потенциально-аварийными участками и требуют проведения регулярных наблюдений, в том числе с применением сейсмоакустических наземных и скважинных методик. Как

правило негативные процессы в надсоляной толще сопровождаются оседаниями земной поверхности, выявляемыми с помощью маркшейдерских наблюдений. Количество профильных линий и частота сейсмических наблюдений зависит от интенсивности происходящих процессов. В наиболее опасных местах бурятся геофизические наблюдательные скважины. В настоящее время на Верхнекамском месторождении действует сеть из нескольких десятков наблюдательных инженерно-геологических скважин, в которых проводится ежегодный мониторинг происходящих техногенно-геологических процессов. Глубины скважин составляют, как правило, не более 70 м, что определяет специфику их изучения, поскольку весьма существенный интервал в скважине приходится на рыхлый приповерхностный слой, представленный четвертичными отложениями.

4.2.1. Примеры совместного применения ВСП и МСП для изучения причин волновой аномалии по данным наземной сейсморазведки

Участок исследования является социально-ответственным объектом, поскольку расположен в населенном пункте и находится в потенциально опасной зоне, выделенной по результатам малоуглубинной и инженерной сейсморазведки (рисунок 4.16). Зона выделена по нарушению осей синфазности, изменению динамических характеристик. Наиболее отчетливо данное нарушение проявляется в верхней части разреза, поэтому на участке и проведены дополнительные скважинные исследования, для того чтобы уточнить сейсмогеологическое строение данного участка и причины возникновения аномалии волнового поля. По результатам наземных исследований в терригенно-карбонатной толще прослежено два отражающих горизонта (ОГ): ТКТ1 и ТКТ2. С соляно-мергельной толщей связаны два интенсивных отражающих горизонта – кровля (ОГ СМТ) и ОГ СМТ1, который отождествлен с кровлей верхнего пласта гипсов в СМТ.

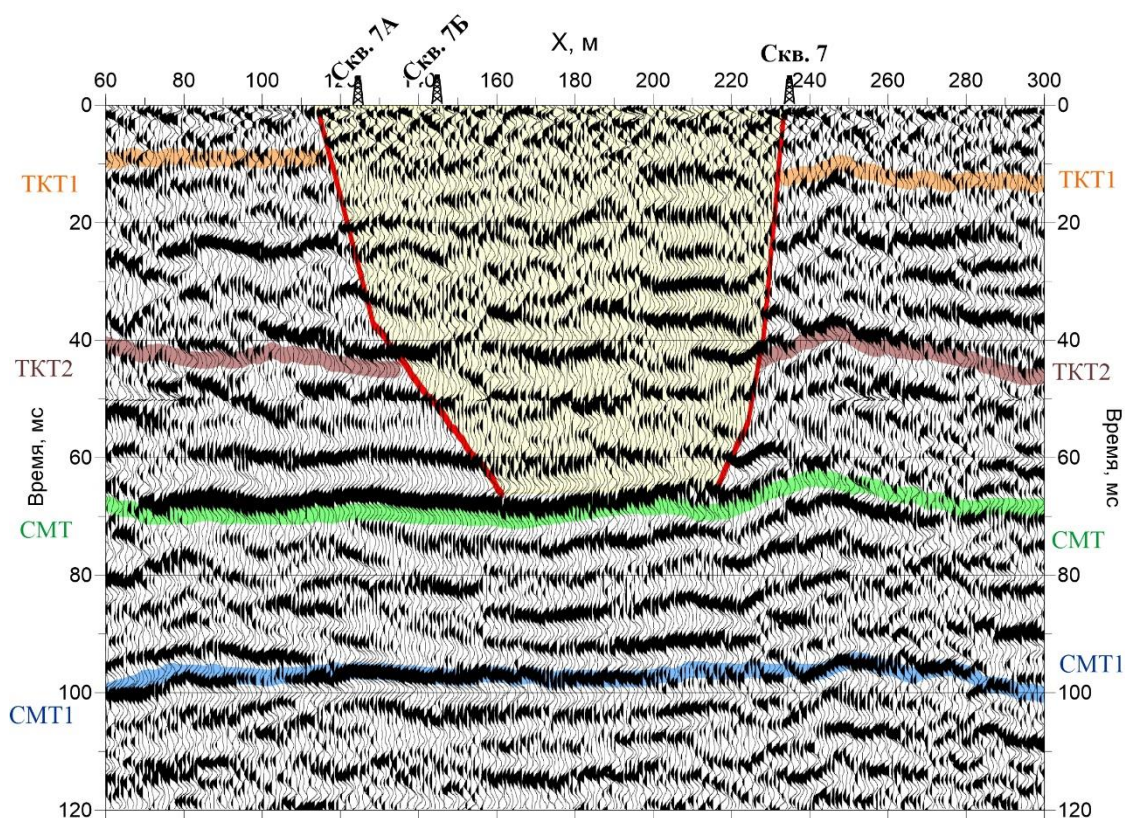


Рисунок 4.16 – Временной разрез по данным инженерных исследований

На профиле располагается инженерно-геологическая скважина 7ИГ, кроме того, специально для данных работ дополнительно пробурено две скважины 7А и 7Б, которые после окончания исследований были ликвидированы. В скважине 7 выполнено ВСП, между парами скважин 7А-7Б, и 7А-7ИГ выполнено МСП. Таким образом получено 3 разнородных набора данных. Просвечивания отличаются расстоянием между скважинами, для 7А–7Б расстояние составило 20 м, а для 7ИГ-7А – 97 м. Соответственно и точность выполнения скоростных построений по двум наборам данных различна. Скоростная характеристика по данным просвечивания 7А-7ИГ более интегральна, в то время как просвечивание 7А–7Б позволяет получить детальное распределение скоростей между скважинами.

4.2.1.1. Вертикальное скважинное сейсмопрофилирование в скв. 7ИГ

Непродольное ВСП проведено с скважине 7ИГ с применением кувалды в качестве источника упругих колебаний. Расчет скоростей проводился по принципу томографии, с учетом объема Френеля сейсмических лучей. На

полученном изображении (рисунок 4.17а) на глубине 7-12 м выделяется высокоскоростной слой, в котором в западном направлении скорости падают от 3.3 до 2.2 км/с.

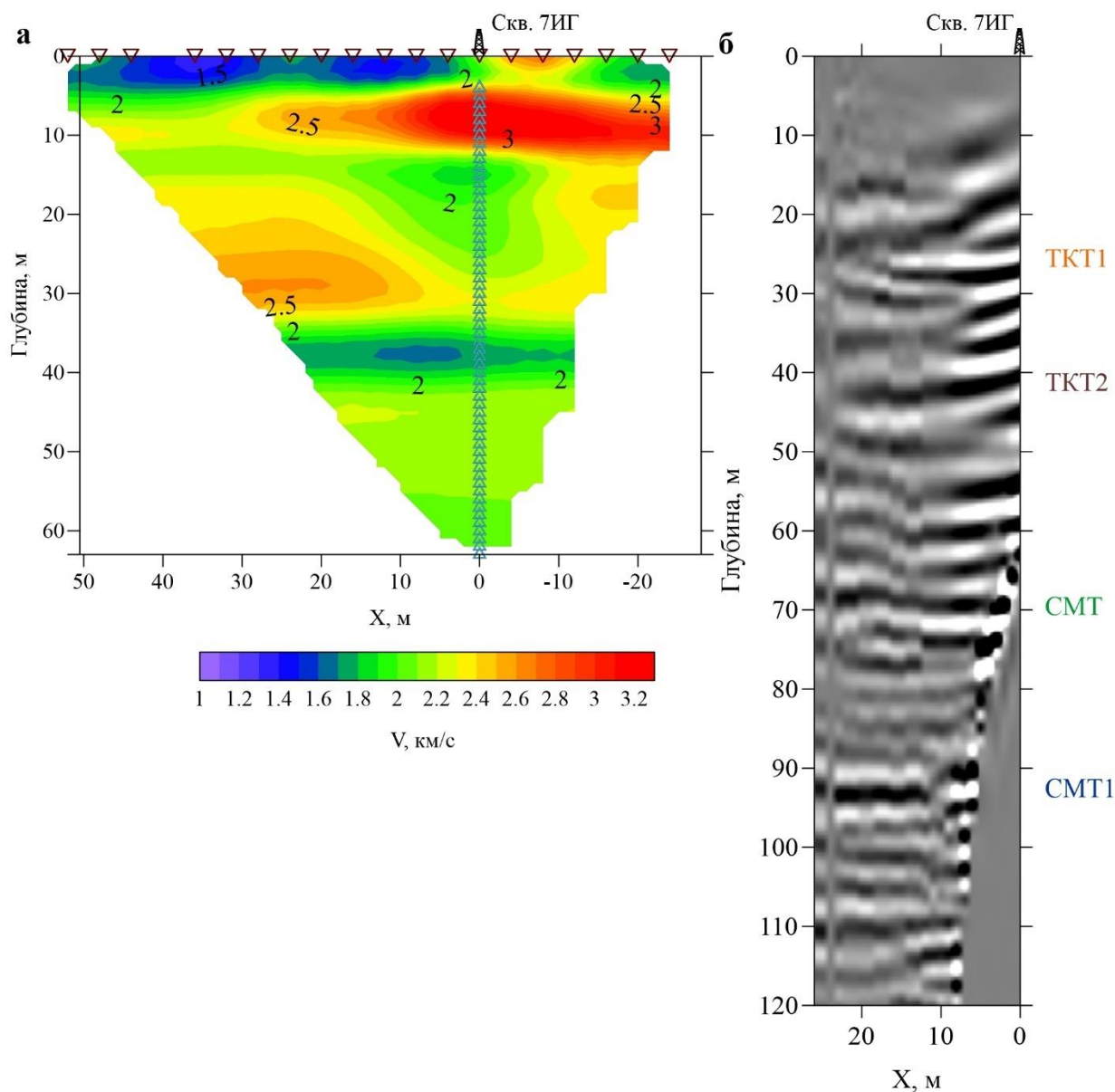


Рисунок 4.17 – Распределение скоростей по данным неперодольного ВСП в скв 7ИГ (а) и результат миграции отраженных волн ВСП-ОГТ (б)

Сравнивая поведение данного слоя с волновой картиной инженерной сейсмозонировки, обращает на себя внимание аналогичное поведение осей синфазности в районе пикетов 200-220 и на временах 10-40 мс. В интервале глубин 35-40 м выделен низкоскоростной пласт, по геологическому описанию скважины совпадающий с интервалом разуплотненного мергеля.

По данному набору данных также проведена миграция отраженных волн ВСП-ОГТ (рисунок 4.17б). С помощью полученного разреза выполнена глубинная привязка отражающих горизонтов.

4.2.1.2. Межскважинное сейсмическое просвечивание

Очевидная связь физических свойств породного массива со скоростными характеристиками среды подтверждается томографическими исследованиями, выполненными между скважинами 7А-7Б и 7А-7ИГ. Расстояние между скважинами 20 м позволяет регистрировать широкополосный акустический сигнал с максимумом спектра в районе 1000 Гц (рисунок 4.18). На сейсмограмме в сортировке параллельного просвечивания хорошо отображаются динамические особенности волнового поля, а также скоростная дифференциация разреза. Так, увеличение времен первых вступлений в интервале глубин 26-34 м, говорит о наличии низкоскоростного пласта, а уменьшение амплитуд в верхней части скважины о слабой сцементированности четвертичных отложений.

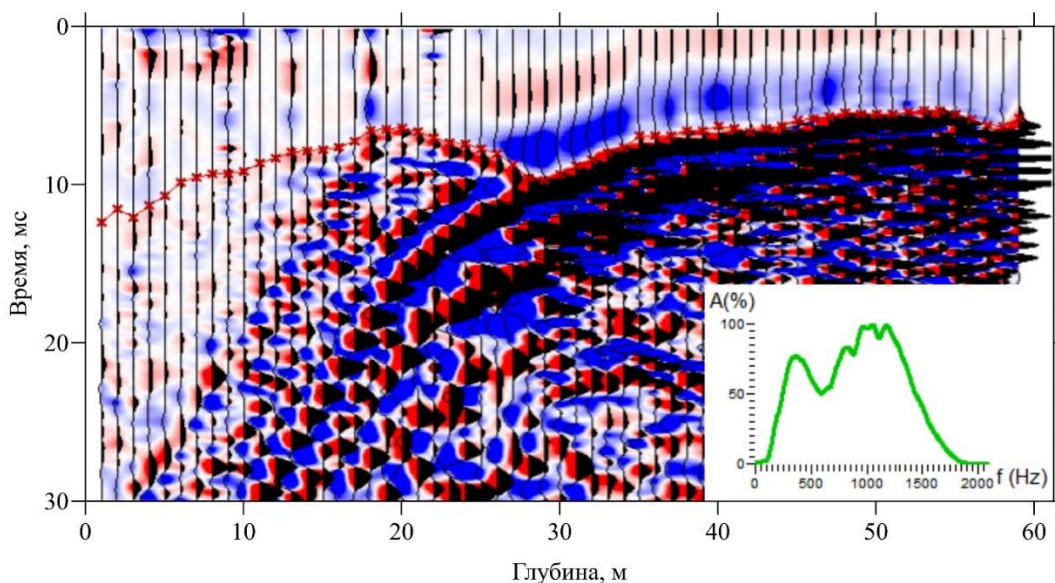


Рисунок 4.18 – Сейсмограмма и амплитудный спектр параллельного просвечивания с нулевым вертикальным удалением. Красный маркер – отметки первых вступлений.

По просвечиванию 7А-7Б с помощью томографии построена скоростная характеристика и выполнена миграция отраженных волн для получения

разреза акустической контрастности. В качестве входных данных о скоростной модели для выполнения лучевой миграции использована smoothed скоростная характеристика по данным томографии.

На рисунке 4.19 приведены две сейсмограммы – исходная и с выделенным полем отраженных волн из нижнего полупространства. Частотный состав отраженных волн ниже, чем первых вступлений, максимум спектра приходится на 800 Гц.

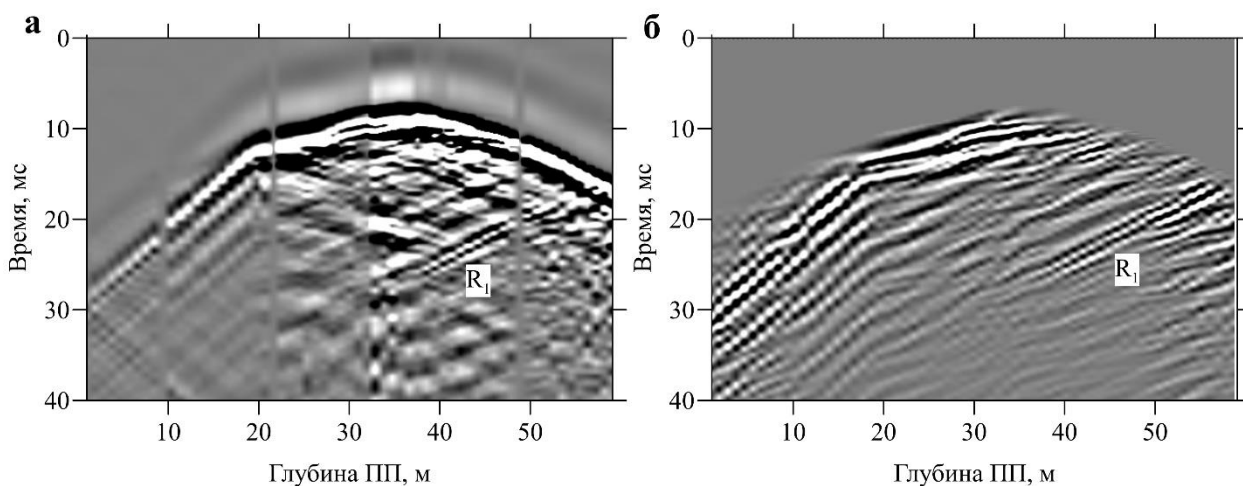


Рисунок 4.19 – Сейсмограммы МСП 7А-7Б. а – исходная сейсмограмма, б – выделенное поле отраженных волн из нижнего полупространства. R_1 – отраженная волна.

На полученных разрезах (рисунок 4.20) отмечается совпадение максимального градиента скоростей и максимумов амплитуд акустической контрастности, что является подтверждением корректности полученных результатов. Сравнение полученных изображений с временным разрезом наземной сейсморазведки дает совпадение структурных элементов. Так, на всех трех изображениях присутствует падение сейсмогеологических границ на восток.

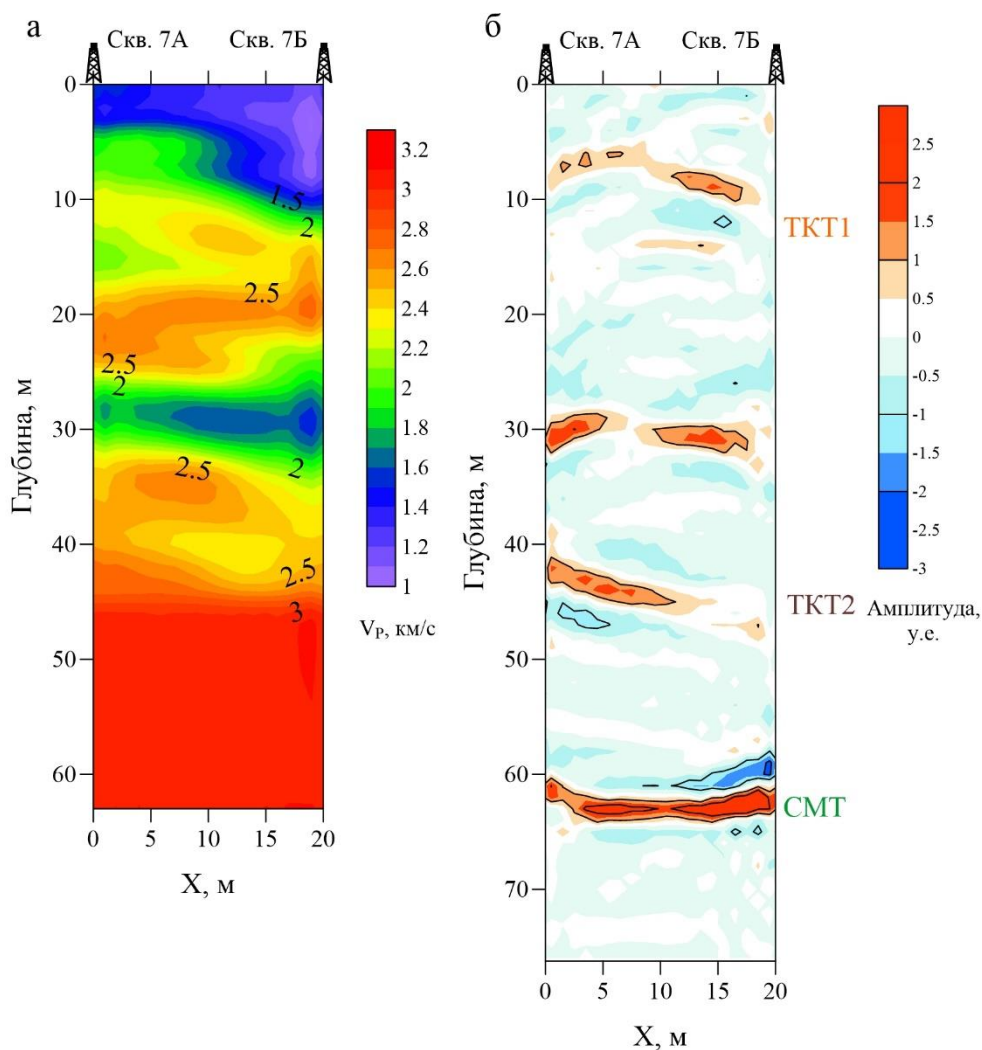


Рисунок 4.20 – Результаты межскважинного просвечивания 7А-7Б. а – скоростное распределение, б – результат миграции отраженных волн.

Различная разрешающая способность полученных скоростных характеристик проявляется в рассогласовании абсолютных значений скоростей, полученных с помощью различных систем наблюдений (рисунок 4.21). При этом локальные аномалии скоростей присутствуют на всех трех изображениях. Это касается низкоскоростных слоев на глубинах 10-15 и 30-40 м.

На основании полученных результатов подтверждена зона неглубокого залегания с аномальными упругими свойствами. Скорости продольных волн по данным МСП в верхней части разреза на отдельных участках падают ниже 2000 м/с. При этом ниже 35 м аномалия не наблюдается. Поскольку разрез представлен отложениями терригенно-карбонатной толщи, то, по всей

видимости, основную роль играет соотношение глинистого и карбонатного материала на разных участках массива.

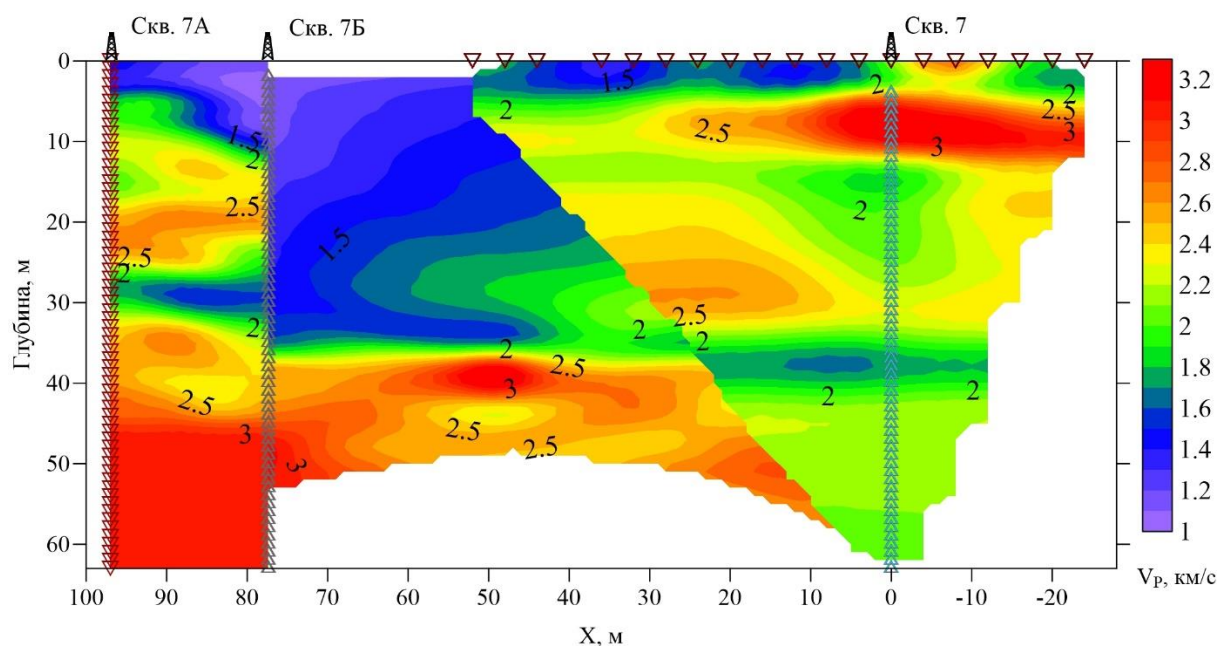


Рисунок 4.21 – Совмещение скоростных разрезов ВСП и МСП

Сравнивая различные методики расчета скоростной характеристики разреза, можно говорить о высокой степени сходимости полученных результатов, общие закономерности поведения скоростей по разрезу совпадают. В качестве примера можно привести контрастную границу на глубине 35 м, выделяемую по данным томографии между скважинами 7А – 7ИГ, по данным наземной инженерной сейсморазведки (граница ТКТ2), а также по лабораторным исследованиям физико-механических свойств керна.

Таким образом, по данным комплексных скважинных сейсмических исследований в пределах участка осложнения волнового поля выделена низкоскоростная зона, позволяющая предположить возможность активизации суффозионных процессов.

4.2.2. Обнаружение вертикальных зон трещиноватости в методе ВСП

Следующий пример иллюстрирует возможность обнаружения субвертикальных зон трещиноватости связанных со вторичными процессами

в приповерхностной части массива на участке интенсивных оседаний подработанной территории.

В скважине глубиной 70 м выполнены работы методом непродольного ОВСП по трем профилям. Возбуждение упругих волн осуществлялось в скважине электроискровым источником, прием на поверхности геофонами вертикальной ориентации. Схема наблюдений на рисунке 4.22.

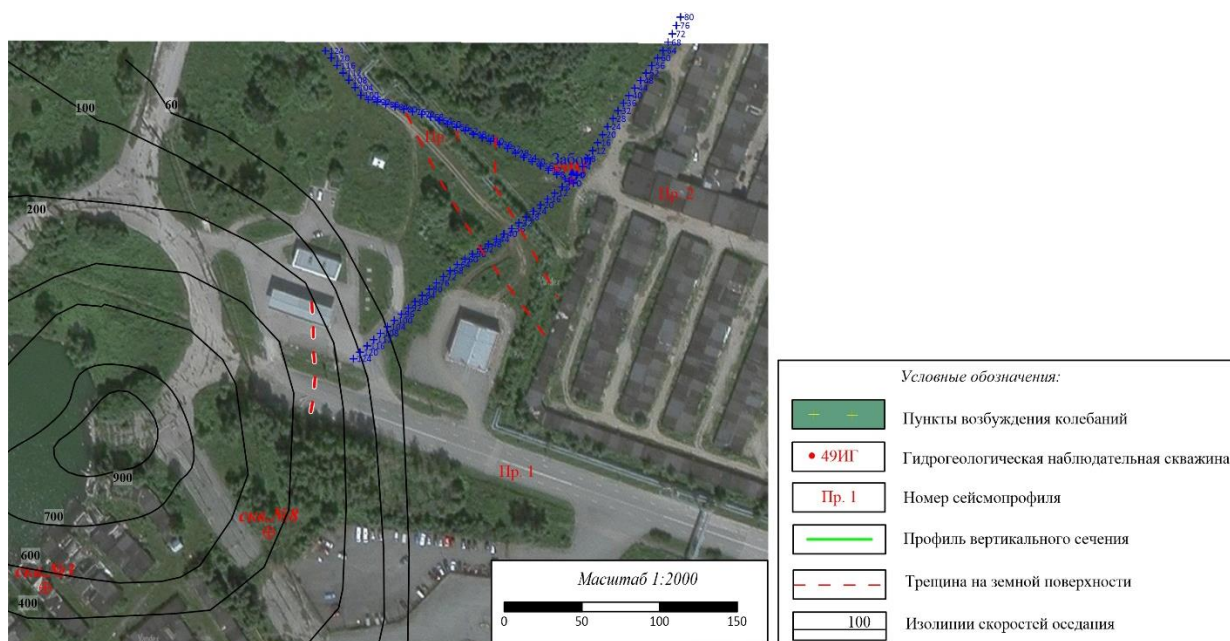


Рисунок 4.22 – Схема пунктов приема на скв. 49ИГ

На сейсмограммах ОПВ наблюдается прямая волна Р, и на отдельных участках проявляются эффекты отражения и преломления на субвертикальных акустических границах (рисунок 4.23). Так, в районе пикета Х=-76 берут начало отраженная волна P_2P , обменно-отраженная волна P_2S , и обменно-преломленная PS . Лучевое моделирование для предполагаемой схемы продольных лучей приведено на рисунке 4.24. В модели заложен низкоскоростной слой мощностью 16 м.

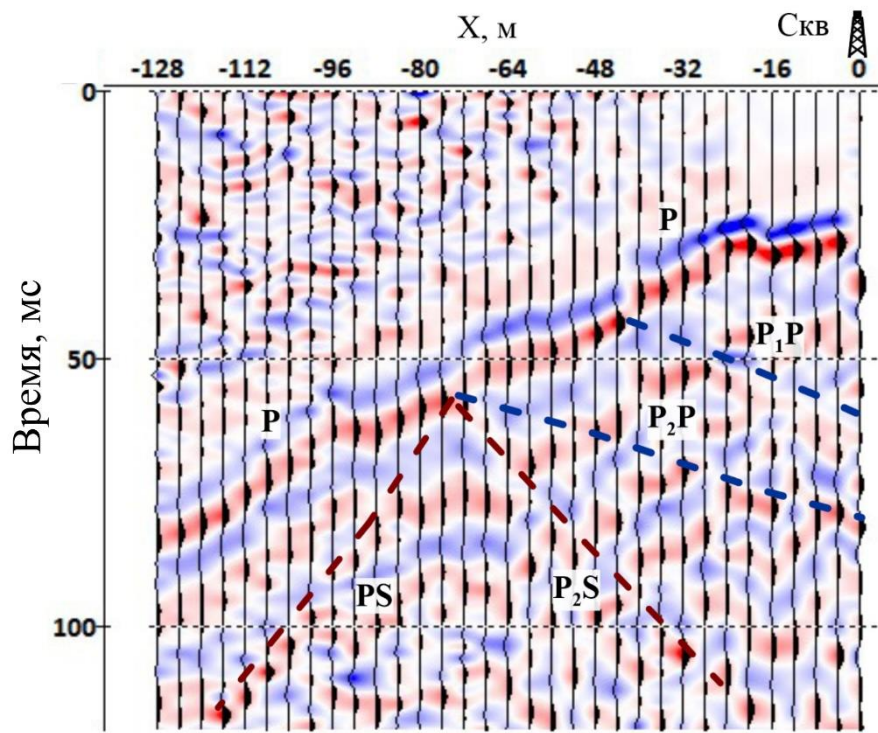


Рисунок 4.23 – Сейсмограмма ОПВ. Источник в скважине на глубине 27 м. Профиль №1.

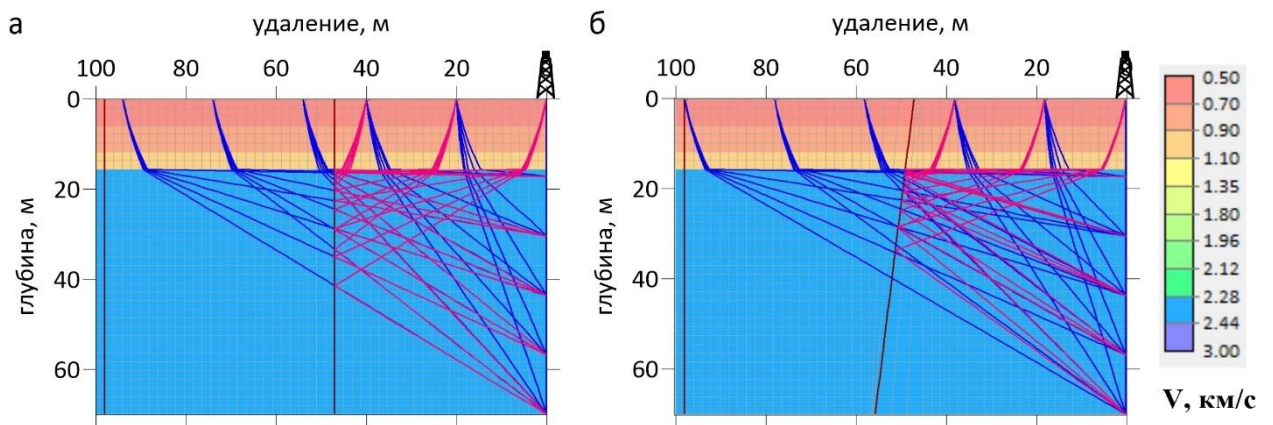


Рисунок 4.24 – Лучевое моделирование отражений продольных волн от субвертикальных границ в методе ВСП. Наклон границы 0° (а), 10° (б)

По данным прямых волн выполнен расчет скоростной характеристики (рисунок 4.25), которая легла в основу миграции ВСП-ОГТ в двух направлениях – традиционном, в предположении субгоризонтальных границ, и с переменной осей скважины и приемной линии, для поиска субвертикальных границ.

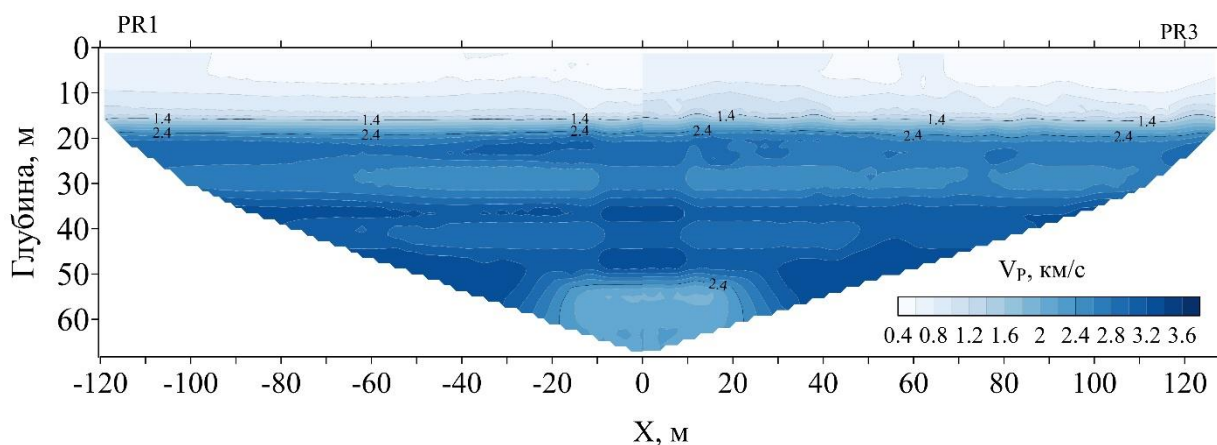


Рисунок 4.25 – Скоростная характеристика по профилям №1 и №3

В результате построены сейсмические изображения, сведенные на одну плоскость (рисунок 4.26). В волновом поле довольно ярко проявляются вертикальные акустические границы, предположительно ассоциированные с вертикальными трещинами отрыва, возникшими в результате интенсивных оседаний к юго-западу от скважины. Вертикальная граница на пикете -30 м на верхнем изображении согласуется с потерей корреляции осей синфазности горизонтальных границ на нижнем изображении на таких же удалениях.

Выделенная граница на пикете -110 м по всей видимости приурочена к вертикальной трещине, видимой на поверхности земли (см. рисунок 4.22). В связи с этим необходимо отметить трехмерный характер распространения волн, когда отражения на профильной линии фиксируются от объекта, расположенного в стороне от нее.

Таким образом, с помощью скважинных исследований выполнено уточнение сейсмогеологического строения и положение субвертикальных ослабленных зон.

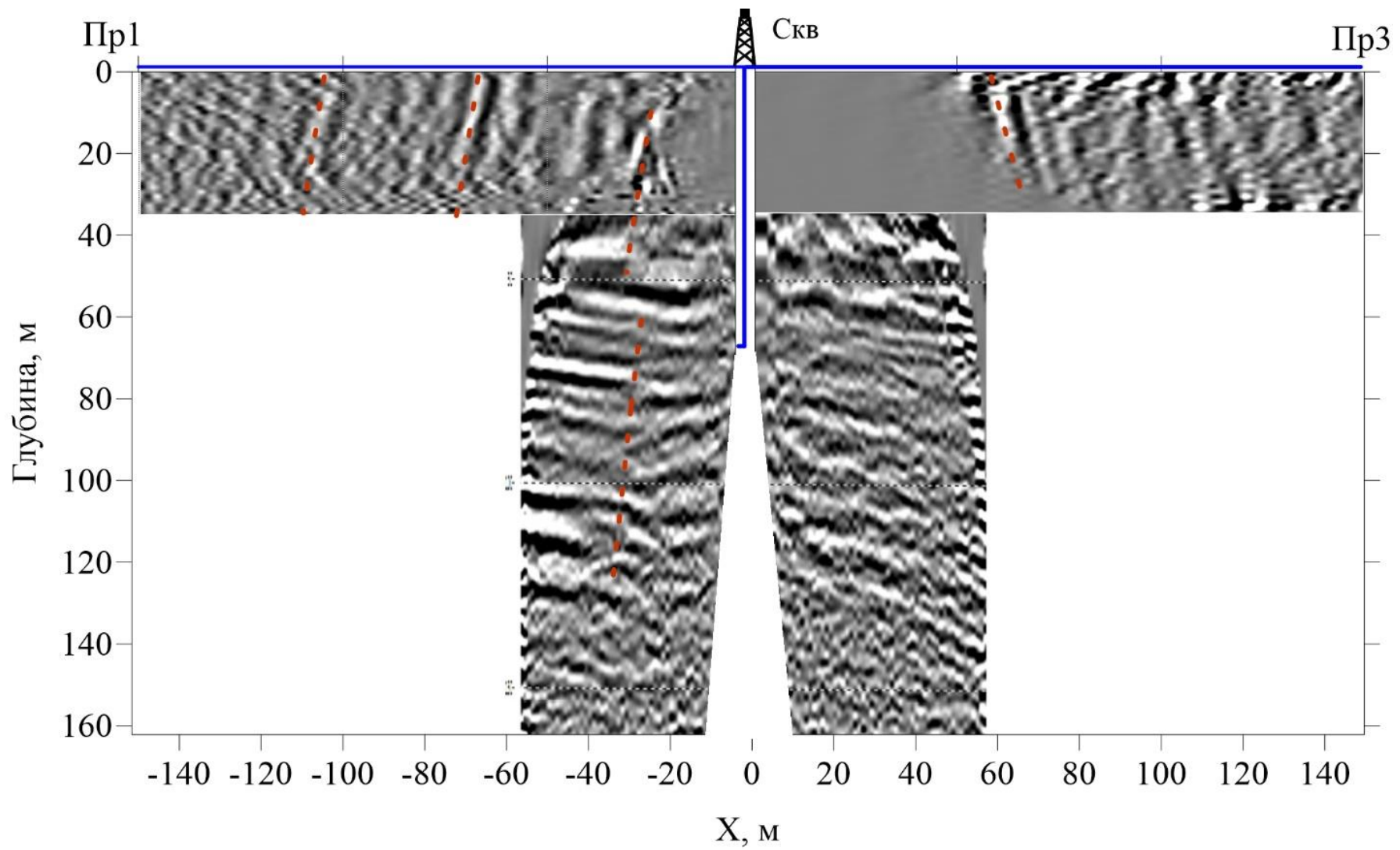


Рисунок 4.26 – Сводный результат миграции неперодольного ВСП

4.2.3. Поиск субвертикальных зон с помощью преломленных волн

Поиск вертикальных отражающих границ с помощью отраженных волн может применяться на небольшом расстоянии от скважины (до 100 м). На больших удалениях лучше проявляет себя способ преломленных головных волн описанный в пп. 2.2.4.

В следующем примере рассматривается участок, на котором наземными сейсмическими исследованиями выделен участок аномального геологического строения (рисунок 4.27).

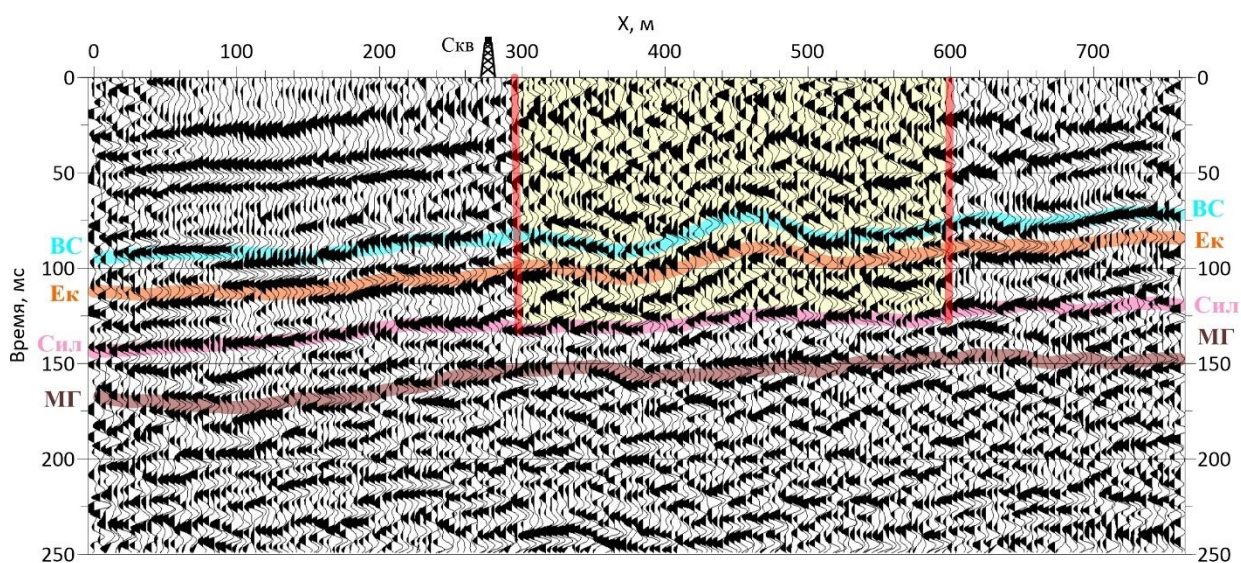


Рисунок 4.27 – Временной сейсмический разрез по данным малоглубинной сейсморазведки

На основании данного разреза на границе выделенной зоны заложена инженерно-геологическая скважина глубиной 60 м, в которой выполнен комплекс сейсмических исследований, включая обращенное непродольное ВСП по нескольким профилям.

На сейсмограммах ОПП (рисунок 4.28), начиная с удаления 68 м появляются головные волны с обратным наклоном годографа (на трассах с большей глубиной ПВ волна регистрируется на более ранних временах). После предварительной обработки и ввода временных поправок за положение ПВ, сейсмограммы просуммированы, в результате получены суперсейсмограммы ОПВ, представленные на рисунках 4.29-4.31.

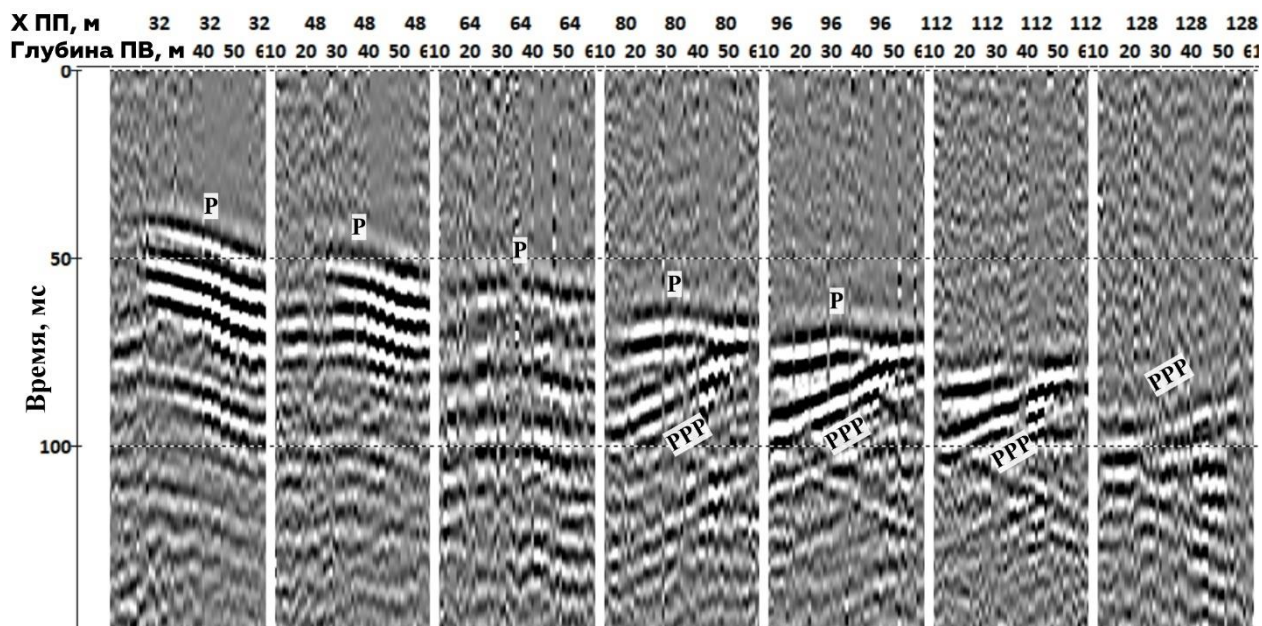


Рисунок 4.28 – Сейсмограммы ОПШ на поверхности. P – прямая волна, PPP – головная волна

В результате суммирования проявляются оси преломленно-отраженных волн, которые связаны с субвертикальными акустическими границами. На основании полученных данных выделены участки субвертикальной трещиноватости. Наличие нескольких профилей на изучаемой площади позволили выполнить площадные построения (рисунок 4.32).

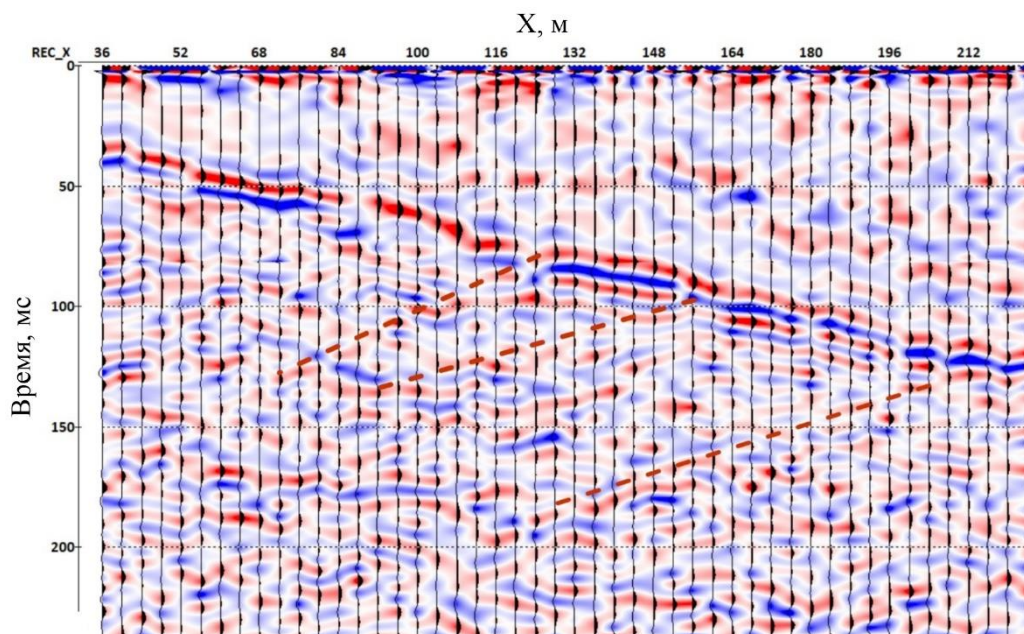


Рисунок 4.29 – Результат обработки преломленных волн с выделением преломленно отраженных волн от субвертикальных границ, скв. 50 ИГ, профиль 2

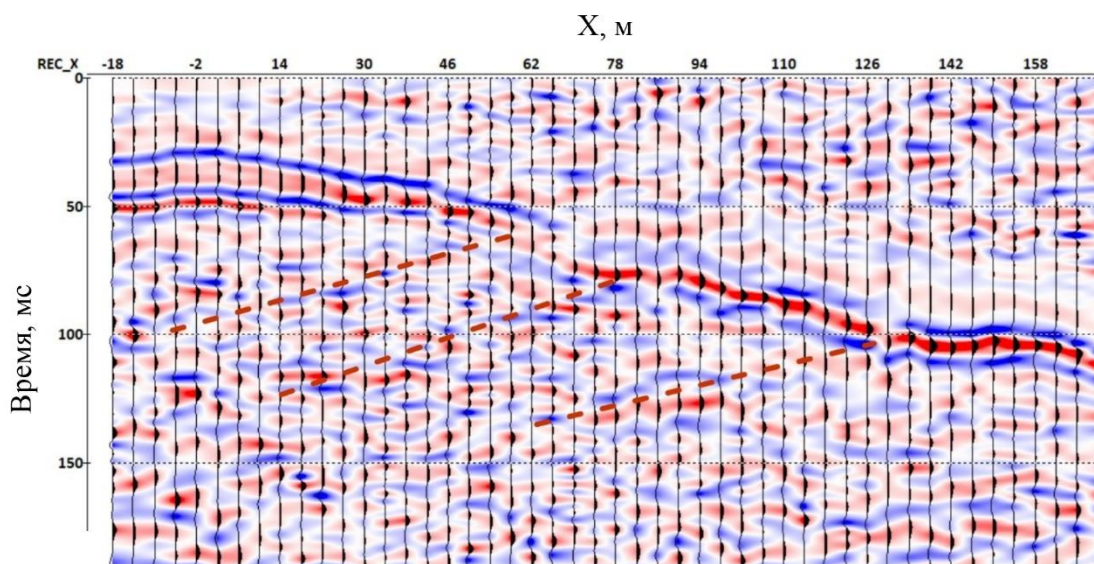


Рисунок 4.30 – Результат обработки преломленных волн с выделением преломленно отраженных волн от субвертикальных границ, скв. 50ИГ, профиль 3

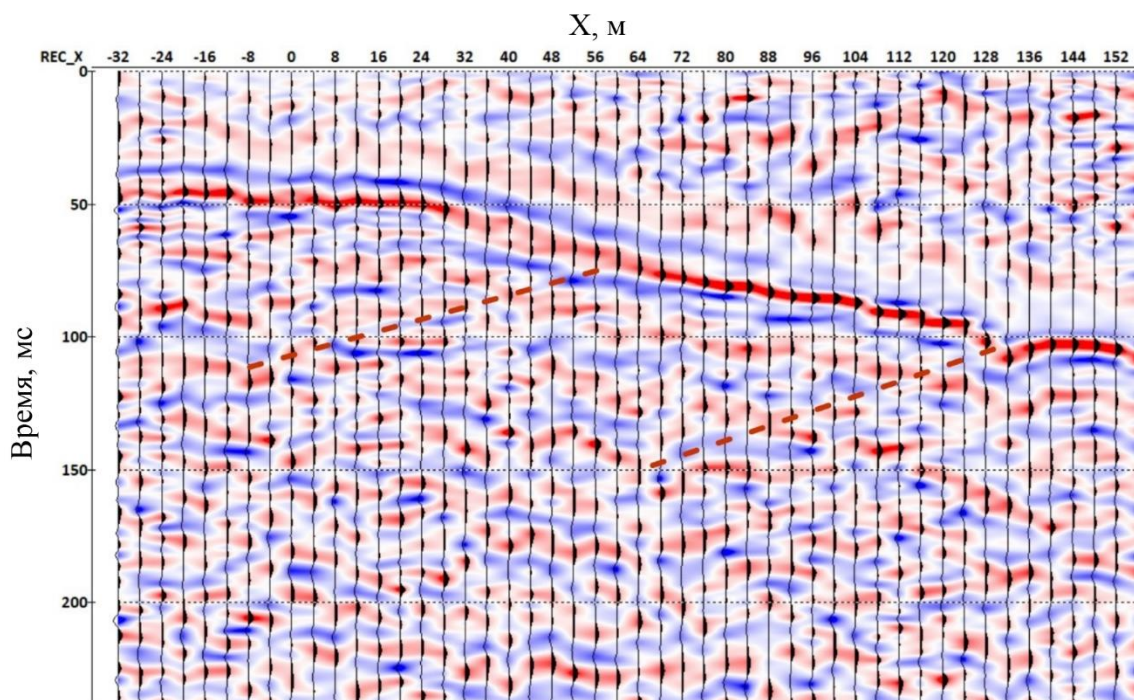


Рисунок 4.31 – Результат обработки преломленных волн с выделением преломленно отраженных волн от субвертикальных границ, скв. 50ИГ, профиль 4

Отмеченные зоны в плане совпадают с осями складок, выделенных по наземным исследованиям. Таким образом, применение скважинных сейсмических исследований позволило уточнить строение зоны аномального геологического строения и выявить вертикальные акустически-контрастные зоны, предположительно с ослабленными физико-механическими свойствами.



Рисунок 4.32 – Результаты интерпретации преломленных волн в методе ОВСП

4.2.4. Оценка достоверности скоростных характеристик, получаемых в инженерно-геологических скважинах на ВКМС

Для оценки точности применяемых методик и достоверности получаемых результатов, за пределами шахтного поля пробурена контрольная «фоновая» скважина, в которой на протяжении нескольких лет проводились скважинные сейсмоакустические исследования. Изменение скоростей распространения упругих волн, получаемое в этой скважине, не связано с влиянием выработок. Основными факторами, определяющими разброс измеряемых значений являются точность измерений и сезонное колебание влажности горных пород. На рисунке 4.33 представлены скоростные колонки в фоновой скважине, построенные в период с 2013 по 2016 годы, на основании

которых рассчитано среднеквадратическое отклонение скорости вдоль ствола скважины. На графике среднеквадратических отклонений выделяются две зоны - приповерхностная часть (по фоновой скважине глубина до 18 м), где скорости изменяются весьма существенно (10-25% и более), и нижняя часть, со скоростями, колебания которых не превышают 5%. Сравнение среднеквадратического отклонения скоростей с данными расходомерии позволяет сделать вывод, что на участках с наличием водопритока, зарегистрированного при бурении скважины, колебания скоростей повышаются.

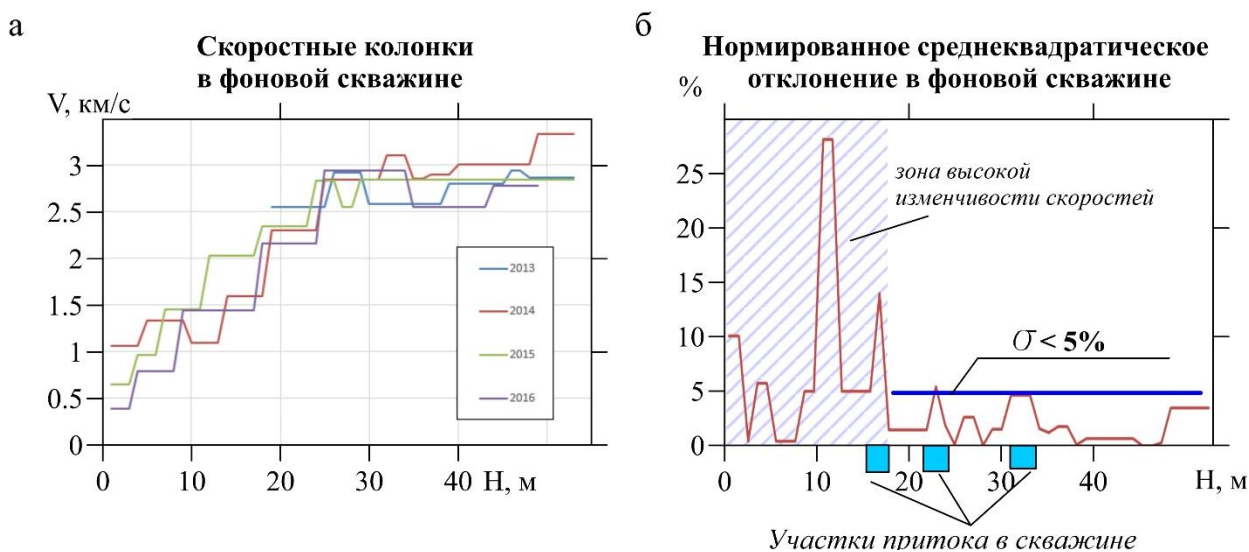


Рисунок 4.33 – Скорости продольных волн и разброс значений в фоновой скважине

Необходимо отдельно выделить верхнюю зону высокой изменчивости скоростей (по фоновой скважине до глубины 18 м), где разброс измеряемых значений весьма существенный и составляет до 30%, что связано с высокой пористостью и сезонным изменением гидродинамического режима. Значение глубины изменчивой зоны в других скважинах может меняться в зависимости от геологических условий. Что касается нижележащих слоев, то здесь нормированное среднеквадратическое отклонение не превышает 5%, что позволяет, используя правило 2 сигма, с достоверностью 95% выбрать значение 10% в качестве критерия значимости изменения скорости.

Таким образом, на основании исследований в фоновой скважине получен коридор колебания скоростей, выход за пределы которого будут

означать значимые изменения скорости, связанные с техногенными факторами, что позволяет делать оценки о наличии или отсутствии негативных изменений в массиве на изучаемых участках.

4.3. Контроль формирования ледопородного ограждения при строительстве шахтных стволов

Традиционно для контроля формирования ледопородного ограждения при проходке шахтных стволов и тоннелей применяется способ межскважинного акустического просвечивания [Архипов, 2016]. Способ заключается в попарном просвечивании соседних замораживающих колонок с целью оценки смыкания ледопородного ограждения и как правило проводится в три этапа – до начала заморозки, во время и после окончания заморозки, непосредственно перед проходкой ствола. Данный способ обеспечивает высокую разрешающую способность, позволяя выявлять даже незначительные непромерзшие окна в ледопородном ограждении, что является его несомненным преимуществом. При этом способ связан с необходимостью отключения подачи хладоносителя и с организационной точки зрения вызывает определенные сложности, поскольку выполнение заморозки, проходки ствола, технического контроля, и геофизических измерений, как правило, осуществляется разными подрядчиками. Нельзя также не отметить трудоемкость такого способа, когда на одном этапе необходимо провести более 20 просвечиваний на каждом стволе. Таким образом, изучение способов акустического контроля ледопородного ограждения без использования замораживающих колонок представляется весьма актуальным.

Для снижения трудоемкости предложено выполнение комплекса сейсмоакустических исследований, включающих наземные профильные наблюдения для получения «регионального» строения вмещающих пород и скважинные исследования – вертикальное сеймопрофилирование и

межскважинное акустическое просвечивание, обеспечивающие получение информации на разных масштабных уровнях.

4.3.1. Межскважинные исследования

Исследования выполнены в процессе строительства шахтного ствола на Старобинском месторождении калийных солей (респ. Беларусь). План расположения контрольно-термических (КТ) скважин приведен на рисунке 4.34. Исследования выполнялись в три этапа. До начала заморозки проведен первый этап для определения упругих свойств и волнового поля в нетронутым массиве. На следующем этапе, спустя примерно 60 суток после начала заморозки, проведены промежуточные наблюдения. Спустя 190 суток после начала заморозки выполнен третий «контрольный» этап.

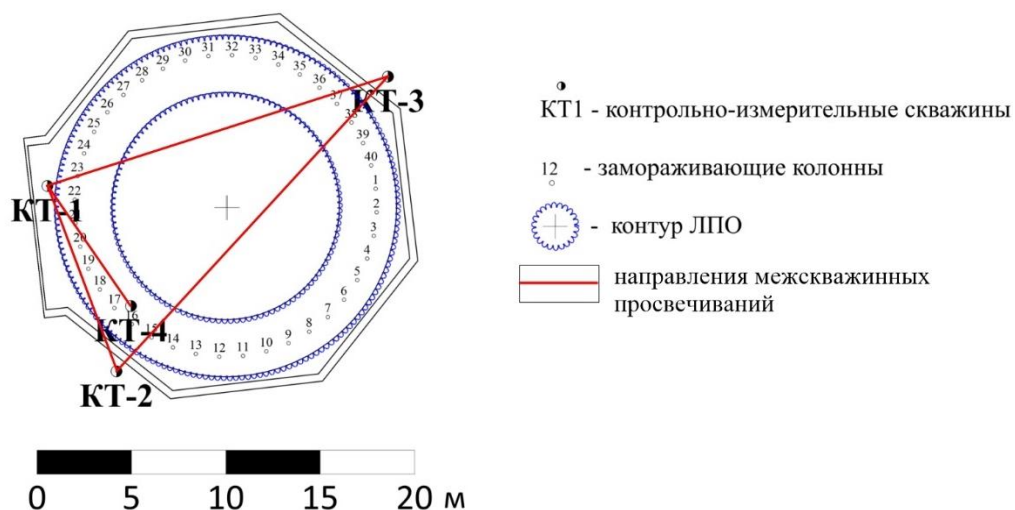


Рисунок 4.34 – Схема расположения контрольно-термических скважин

На каждом этапе измерений просвечивания выполнялись по четырем направлениям, которые можно условно разделить по расстоянию между скважинами на «короткие» - до 10 м и «длинные» - от 10 до 25 м. Просвечивания на короткой базе, особенно КТ-1 - КТ-4 проходят ближе к окружности, по которой расположены замораживающие колонки, соответственно влияние заморозки на этих просвечиваниях будет проявляться более интенсивно. Каждое просвечивание представляет собой серию сейсмограмм с пунктом возбуждения в одной скважине, и приемной линией в другой. Возбуждение упругой волны производится электроискровым

источником с энергией импульса 600 Дж при напряжении 1800 В [Чугаев, 2016]. Поскольку контрольные скважины заполнены рассолом хлорида кальция, применяется бесконтейнерный разрядник, тип разряда – стекание тока. Время разряда накопительных конденсаторов, измеренное в лабораторных условиях, составляет 0.5 мс.

Исследования проводятся в обводненной части скважин. Глубина уровня жидкости меняется по разным скважинам от 5 до 10 м. Приемная линия представляет собой 24-канальную гидрофонную косу с пьезокерамическими приемниками. Шаг пунктов приема на косе – 1 м.

Просвечивание выполняется сверху вниз. В верхнем положении излучатель расположен напротив верхнего датчика косы. Далее с шагом 1 м излучатель перемещается вниз, до достижения глубины 12-го датчика косы. После этого излучатель и приемная коса перемещается синхронно с шагом 1 м. Когда нижний конец косы достигает забоя, приемная линия фиксируется, и излучатель последовательно опускается до уровня 24-го датчика. Глубина контрольных скважин составляет порядка 160 м, поэтому в одном измерении регистрируется около 150 сейсмограмм общего пункта возбуждения.

Первые вступления прямой волны в сортировке по линиям нулевых удалений позволяют, зная инклинометрию скважин, рассчитать скорости по каждому направлению. Скорости по всем направлениям для первого этапа приведены на рисунке 4.35. Среднеквадратическое отклонение значения скорости по четырем наблюдениям не превышает 4%, при этом среднее значение составляет 1,6%.

Частотный состав регистрируемого сигнала варьируется в зависимости длины сейсмического луча. Так, на минимальном удалении (4.5 м) преобладающая частота спектра первых вступлений составляет 3500 Гц, а на максимальном удалении в 20-25 м максимум спектра приходится на 1000-1500 Гц. Очевидно, что при увеличении расстояния происходит поглощение высокочастотной составляющей волнового поля.

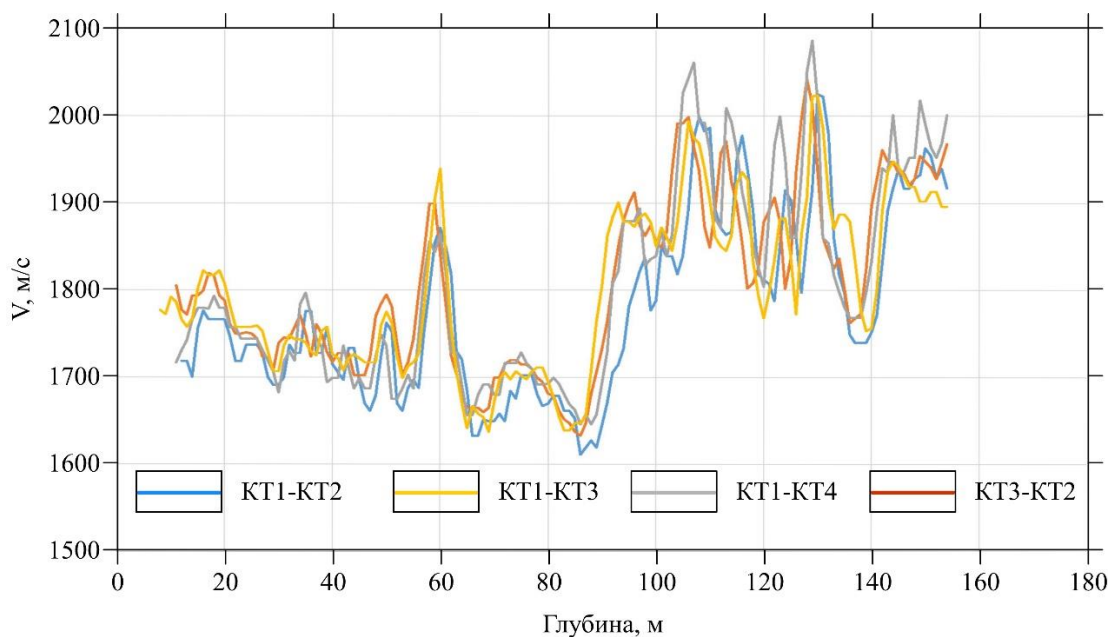


Рисунок 4.35 – Графики скоростей по разным направлениям на основании первых вступлений, первый этап наблюдений.

На втором этапе, на участках благоприятных для промерзания, формируются отдельные зоны смыкания ледопородного ограждения. Это хорошо видно на просвечиваниях с короткой базой (рисунок 4.36). Времена первых вступлений уменьшаются в 2 раза, что говорит о формировании ледопородного контура, где происходит распространение волн.

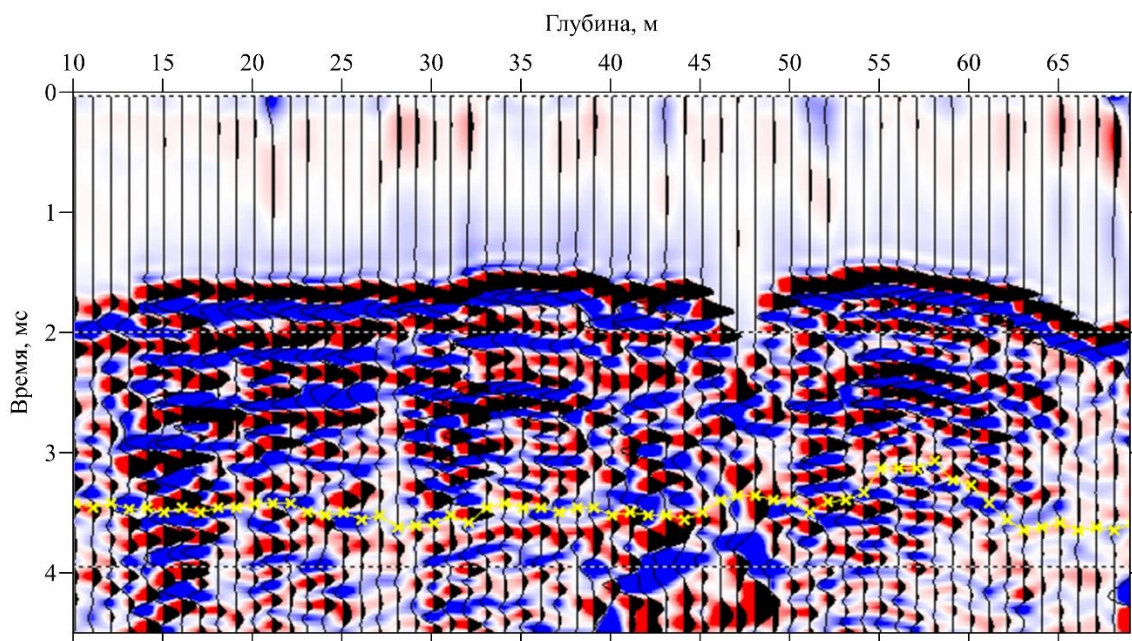


Рисунок 4.36 – Сейсмограмма нулевых удалений на втором этапе. Желтый маркер – отметки времени на первом этапе

При просвечивании на длинной базе увеличение скоростей прямой волны также происходит, но менее существенно. На рисунке 4.37 приведены сейсмограммы нулевого удаления и общего пункта возбуждения для просвечивания на длинной базе.

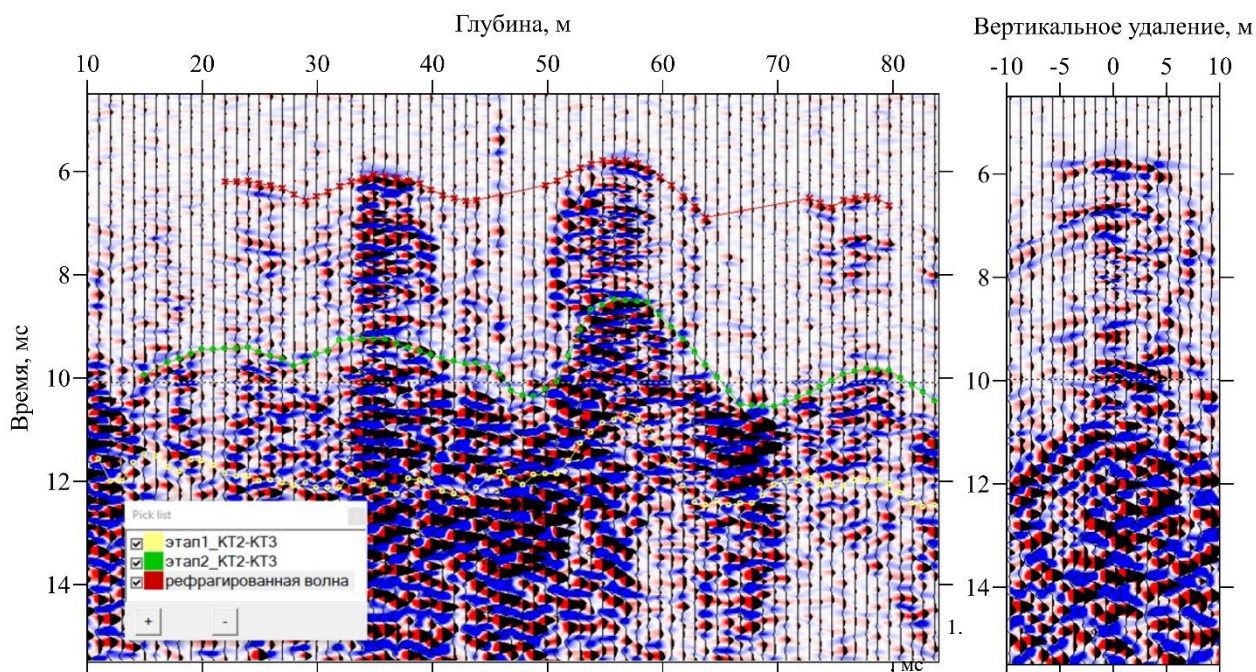


Рисунок 4.37 – а – Сейсмограмма по линии равных удалений. Нанесены отметки времен первых вступлений (желтый – 1 этап, зеленый – 2-й этап) и рефрагированной волны по мерзлым породам; б – сейсмограмма ОПВ

На сейсмограмму наложены отметки времен первых вступлений, зарегистрированных на первом этапе (желтый маркер). Видно, что время первых вступлений на втором этапе (зеленый маркер) уменьшилось. Но, кроме прогнозируемого увеличения скорости по прямым вступлениям, на сейсмограмме на отдельных глубинах формируется волновой пакет на более ранних временах (в районе 6 мс), характеризующийся повышенной частотой (рисунок 4.37б). В связи с его нерегулярностью по глубине сделано предположение, что в данном случае регистрируется рефрагированная волна, которая распространяется по дуге частично сформировавшегося ледопородного ограждения (рисунок 4.38) по аналогии с волной «шепчущих галерей».

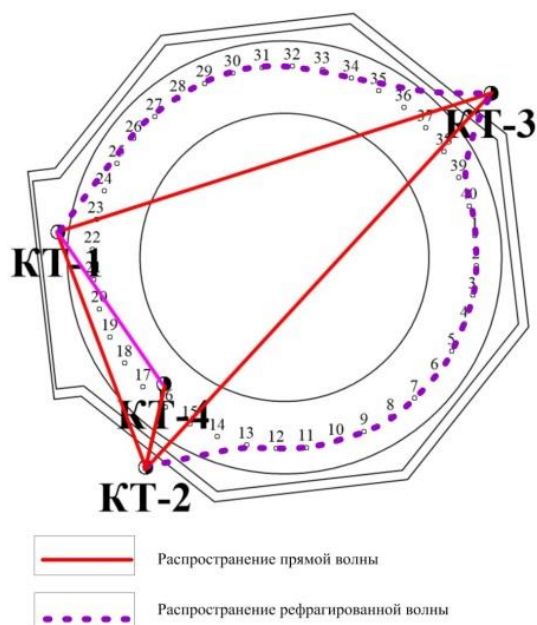


Рисунок 4.38 – Ход лучей рефрагированной волны по мерзлым породам

Зная положение скважин КТ-2 и КТ-3 несложно рассчитать длину дуги, по которой движется рефрагированная волна и скорость ее распространения. Рассчитанные значения скоростей согласуются со скоростями полученными на короткой базе (рисунок 4.39), что подтверждает предположение о движении волны в высокоскоростном ледопородном волноводе.

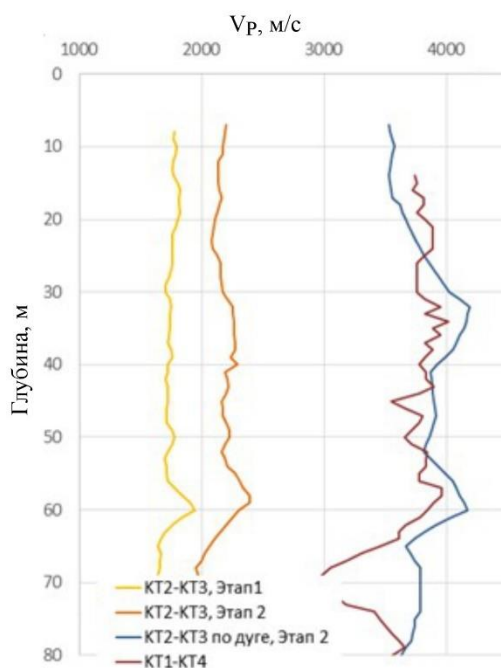


Рисунок 4.39 – Сравнение скоростей полученных на короткой базе измерений (бордовый цвет) и рассчитанный по рефрагированной волне на длинной базе (синий).

Удачное взаимное расположение скважин КТ-2 – КТ-3 позволяет также выделить рефрагированную волну идущую по более длинной дуге. Время ее прихода больше, пропорционально длине пройденного пути.

4.3.2. Расчет мощности ледопородного ограждения

Рассмотрим прохождение волны из скважины КТ-2 в КТ-3. Поскольку на втором этапе мощность ледяной стенки еще небольшая, то скважины расположены за пределами замороженного контура. На пути КТ-2 КТ-3 прямая волна дважды пересекает ледопородное ограждение. Соответственно, время прохождения сигнала на определенной глубине при нулевом вертикальном смещении источник-приемник можно представить в виде суммы времен прохождения через замороженный (Л) и нетронутый массив (М):

$$t = t_{\text{Л}} + t_{\text{М}} \quad (4.1)$$

$$t = \frac{D_{\text{Л}}}{V_{\text{Л}}} + \frac{L_x - D_{\text{Л}}}{V_{\text{М}}}, \quad (4.2)$$

где $D_{\text{Л}}$ – суммарная мощность замороженного массива, L_x – расстояние между скважинами, $V_{\text{Л}}$, $V_{\text{М}}$ – соответственно скорости в замороженном и в незамороженном массиве. Скорость в исходном, незамороженном массиве известна по результатам первого измерения (см. рисунок 4.35), скорость во льду с небольшим допущением можно взять равной скорости полученной при наблюдении на короткой базе (см. рисунок 4.36). Несложно выразить из формулы (4.2) мощность замороженного массива:

$$D_{\text{Л}} = V_{\text{Л}} \frac{L_x - V_{\text{М}}t}{V_{\text{Л}} - V_{\text{М}}} \quad (4.3)$$

В формуле (4.3) не учтено преломление лучей на контрастных границах замороженного массива. Цилиндрическая форма стенок ледопородного массива играет роль линзы, в некоторых случаях рассеивающей, а в некоторых – фокусирующей акустические лучи. Для имеющегося положения скважин КТ-2 и КТ-3 ход лучей показан на рисунке 4.40.

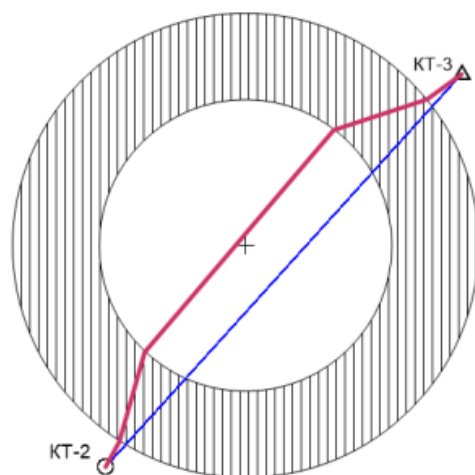


Рисунок 4.40 – Отклонение преломленной волны при прохождении через замороженный массив, красная линия – луч с учетом отклонения луча.

Поправку за искривление лучей достаточно сложно учесть аналитически, поскольку она будет зависеть от значений скоростей мерзлого и вмещающего массива, мощности ледовой стенки и удаления скважин от центра ствола. Однако такую оценку можно выполнить на основе акустogeометрического моделирования (рисунок 4.41). Увеличение пути луча будет происходить за счет увеличения пути в мерзлом массиве, а значит, значения мощности ледопородного массива будут завышаться. Для второго этапа такое завышение составляет порядка 7%.

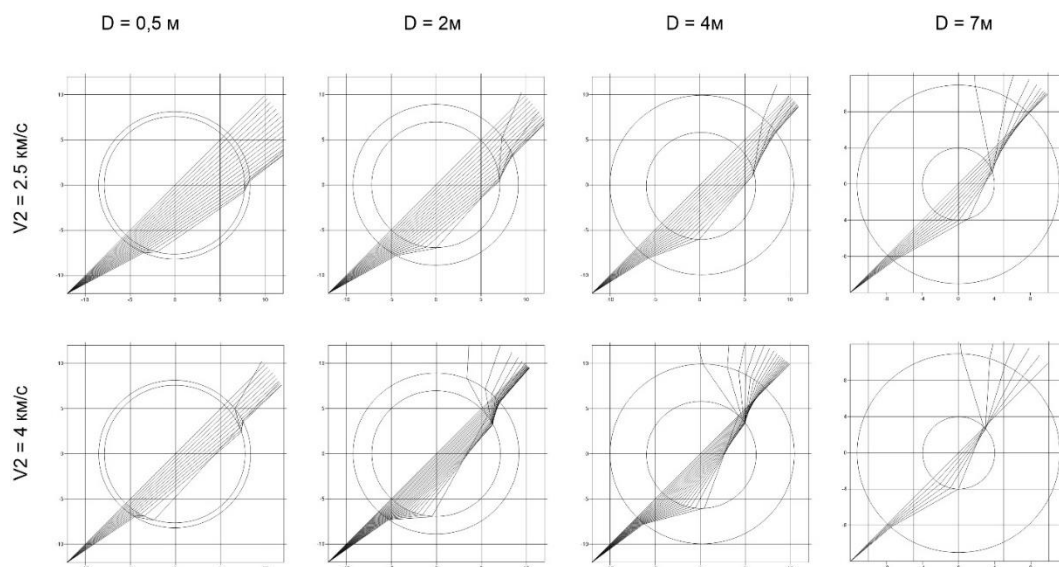


Рисунок 4.41 – Лучевое моделирование распространения акустического сигнала через ледопородное ограждение в горизонтальной плоскости при различных параметрах толщины ЛПО (D), и скорости замороженного массива (V_2).

Распределение мощности стенки ледопородного массива по глубине, взятая как половина мощности общего мерзлого массива, приведена на рис. 4.42. Полученные значения мощности ледопородного ограждения взяты в качестве исходных данных для расчета томографии. Скоростные распределения представлены на рис. 4.43. На распределениях закономерно выделяются участки понижения скоростей на интервалах с повышенной глинистостью.

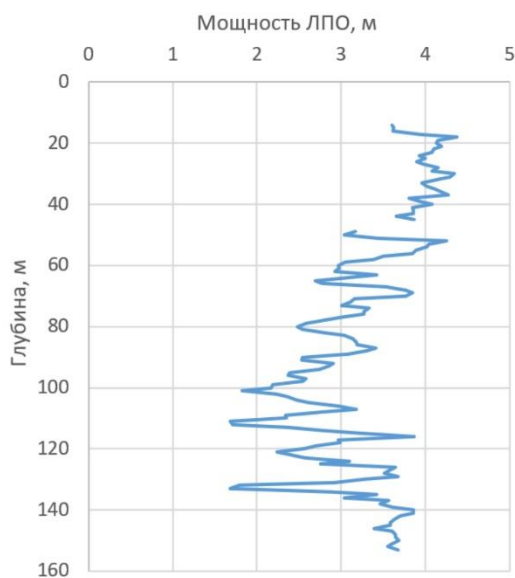


Рисунок 4.42 – Распределение мощности стенки ледопородного массива по глубине

На третьем этапе, когда ледопородное ограждение сформировалось полностью, скважины КТ-1 и КТ-4 по данным термометрии находятся внутри контура отрицательных температур. Это позволяет уточнить скорость распространения волн в замороженном массиве. На рис. 4.44 приведено сравнение скоростей на втором и третьем этапе. Измеренные значения скоростей на втором и третьем этапе отличаются незначительно. Наибольшие изменения наблюдаются в глинистых интервалах и составляют не более 10 %. Необходимо отметить, что на момент проведения измерений по третьему этапу часть технологического отхода ствола до глубины 45 м уже была пройдена, поэтому в верхней части массива скорости на третьем этапе незначительно уменьшились в связи с растеплением массива и изменением

напряженно-деформированного состояния вокруг пройденного участка ствола.

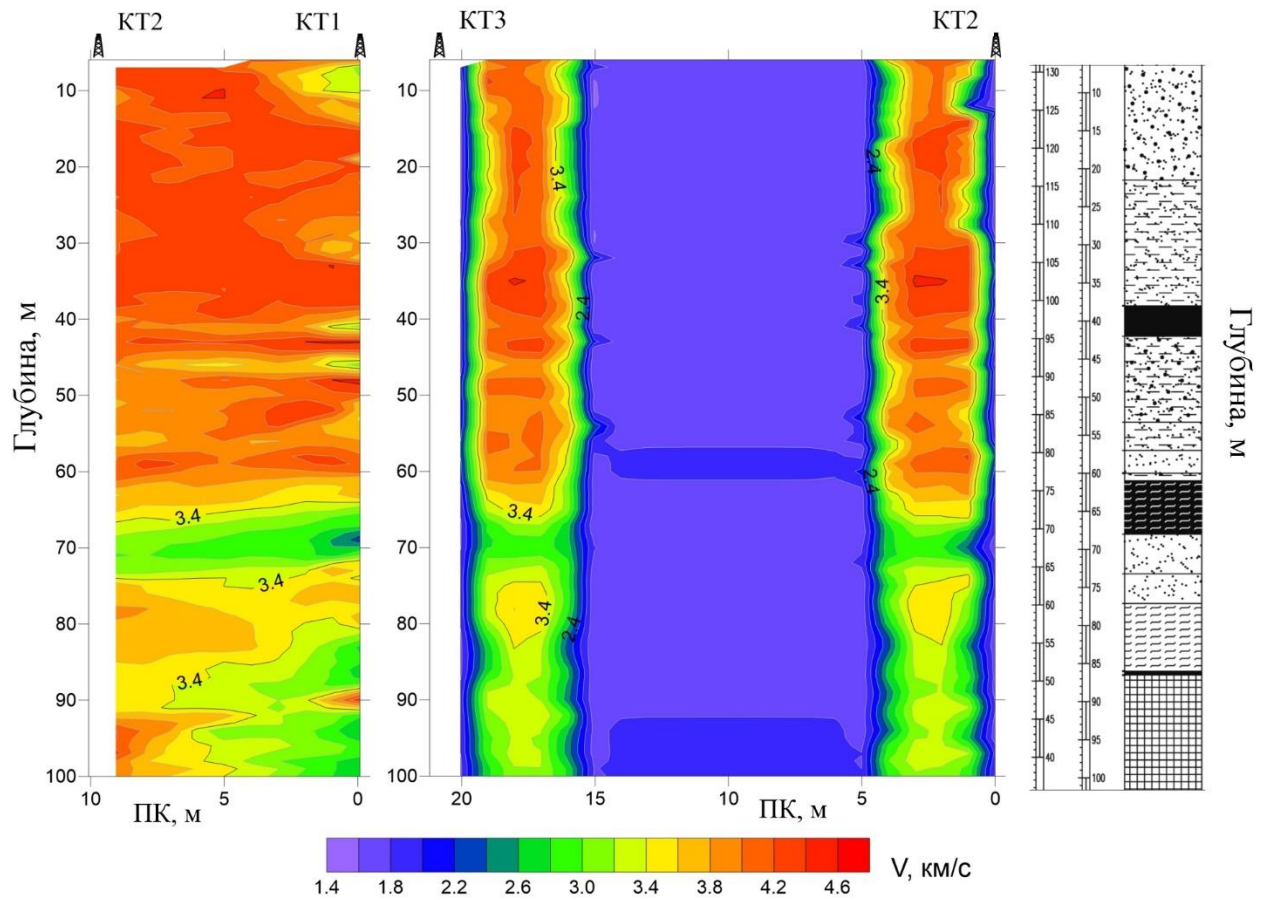


Рисунок 4.43 – Скоростные распределения по данным томографии, 2-й этап

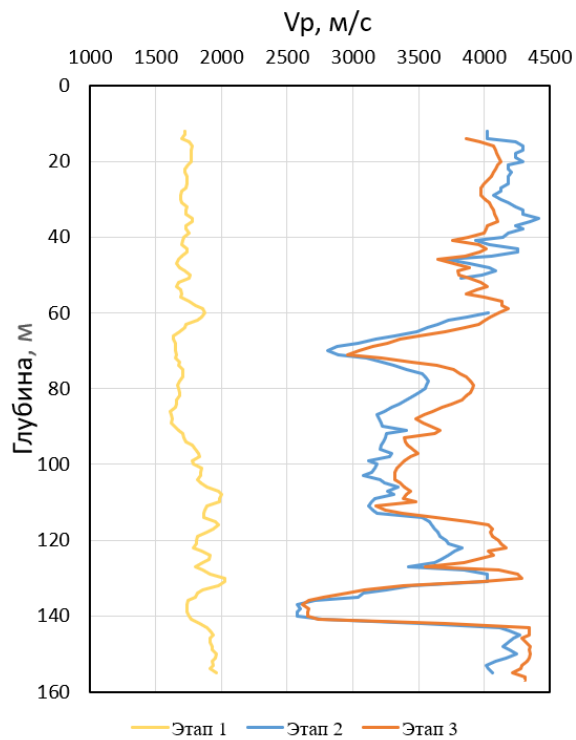


Рисунок 4.44 – Сравнение скоростей по измерениям на короткой базе

Сравнение скоростей по разным направлениям (рисунок 4.45а) и распределение скоростей по данным томографии, дает возможность предположить сквозное промораживание пород до центра ствола на отдельных участках. С помощью предложенной методики рассчитана мощность ледопородного ограждения (рисунок 4.46).

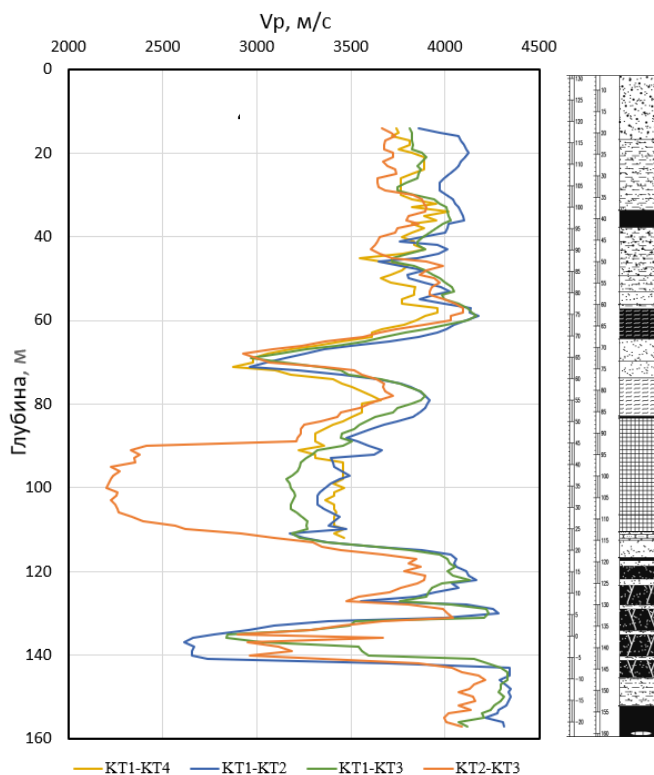


Рисунок 4.45 – а - Сравнение скоростей по разным направлениям;

4.3.3. Скважинное профилирование ОГТ

Межскважинное просвечивание дает лишь интегральное значение мощности ЛПО, что может привести к искажениям при оценке толщины одной из стенок. Уточнение пространственного положения границ ЛПО выполнено путем применения методики скважинного профилирования ОГТ, описанной в разделе 2.3.1. Наблюдения выполняются в тех же скважинах и теми же аппаратными средствами, что и при межскважинном просвечивании. Наличие достоверных оценок скоростей упругих волн в нетронутым и замороженном массиве, полученные по данным МСП, существенно упрощают цифровую обработку. Необходимо отметить, что при контроле ЛПО подход,

основанный на совместном применении МСП и скважинного профилирования ОГТ, применяется впервые.

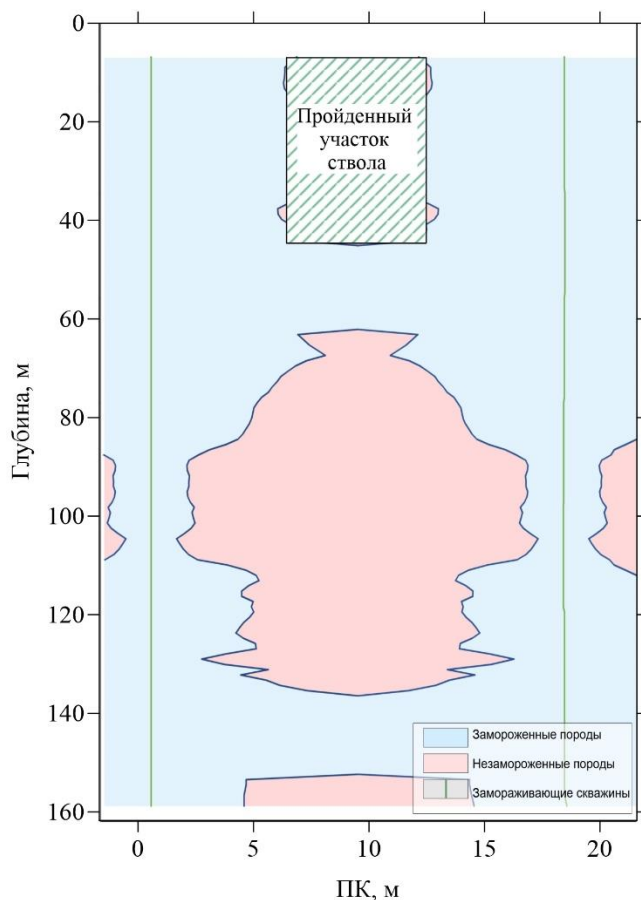


Рисунок 4.46 – Промерзание пород по линии КТ-2 – КТ-3 на третьем этапе

При проведении скважинного профилирования ОГТ наиболее предпочтительным является случай, когда контрольная скважина находится за пределами ЛПО. В этом случае образуется плоскость, секущая цилиндр ЛПО по нормали к его стенкам, и формируется устойчивая волновая картина, на которой выделяются границы ближней и дальней стенок ЛПО.

Это позволяет выполнять цифровую обработку для вертикально-слоистой среды по аналогии с горизонтально-слоистой средой в наземных наблюдениях. В результате строятся временные акустические разрезы, содержащие отражения от вертикальных границ, формирующихся при замораживании породного массива. В результате интерпретации таких изображений с учетом скоростных характеристик (рисунок 4.47) определяется толщина стенок ЛПО в плоскости сечения.

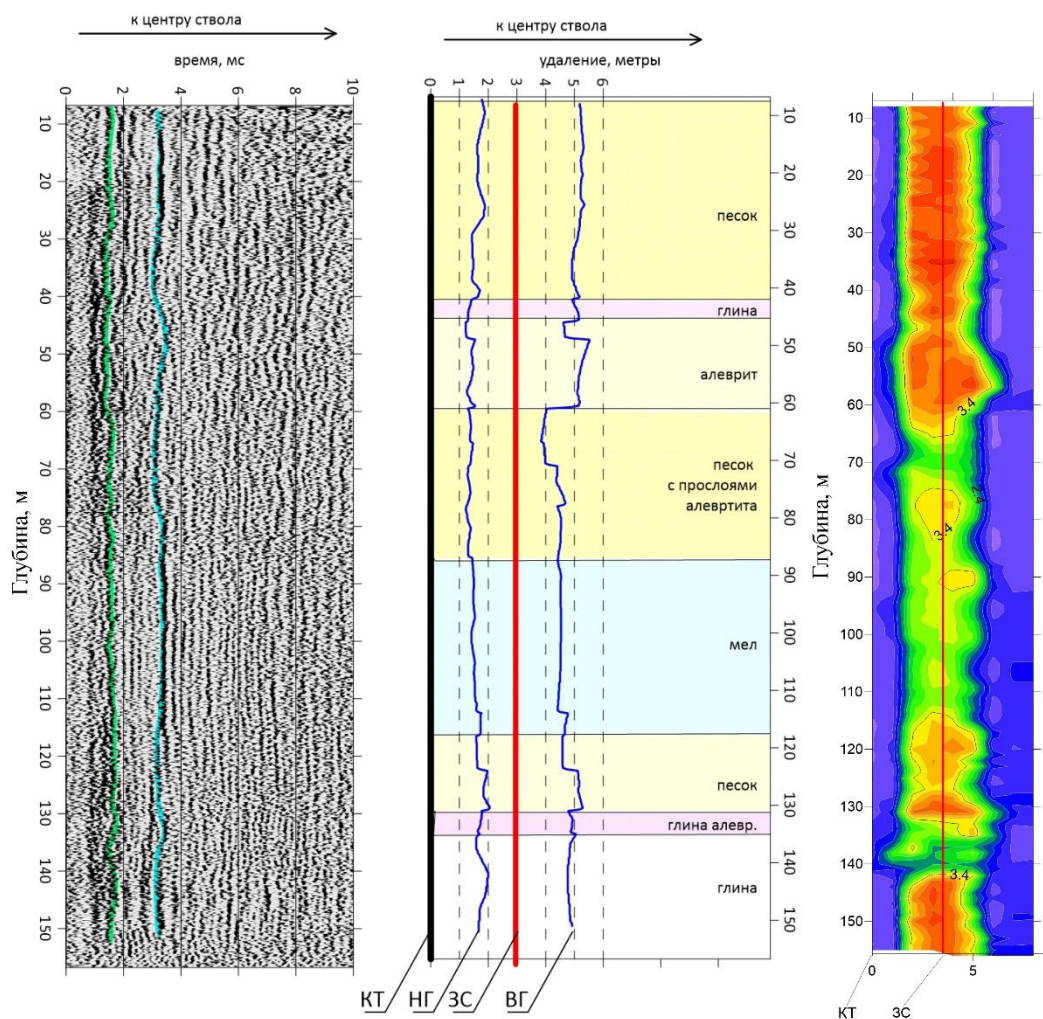


Рисунок 4.47 – Результат обработки и интерпретации скважинного профилирования ОГТ. (а) – временной разрез. (б) – построение глубинного разреза с выделением границ ЛПО. (в) – скорости по данным томографии. КТ – Контрольная скважина; ЗС – замораживающая скважина; НГ – наружная граница; ВГ – внутренняя граница

Сравнение результатов интерпретации МСП и скважинного профилирования ОГТ дает высокую степень сходимости, при этом по данным межскважинного просвечивания выполняется построение скоростной характеристики массива, а скважинное ОГТ обеспечивает получение волновой картины.

4.4. Скважинные исследования в горных выработках

4.4.1. Вертикальное сейсмопрофилирование в горной выработке

Особую специфику скважинные исследования приобретают при выполнении в горных выработках. Здесь скважины могут быть пробурены в любом направлении, и наиболее актуальным для контроля ВЗТ является изучение верхней полуплоскости.

На основании многолетнего опыта выполнения шахтных сейсмических исследований в условиях ВКМС важной особенностью регистрируемого волнового поля являются интенсивные поперечные и обменные волны, регистрируемые в том числе при использовании однокомпонентных сейсмических датчиков. Сходная картина регистрируется и при проведении шахтных скважинных исследований.

Шахтные скважинные исследования ВСП проведены в вертикальной скважине, пробуренной в кровлю выработки, общей длиной 30 м, с помощью одноканального трёхкомпонентного скважинного зонда с прижимным устройством. С практической точки зрения выполнение таких работ с реализацией многолучевого подхода является достаточно трудоемким, поскольку требует многократного прохождения всего профиля возбуждения, в соответствии с количеством положений пункта приема в скважине. Цифровая регистрация осуществлялась с шагом дискретизации 0.1 мс; источник ударного типа, количество накоплений при возбуждении упругих колебаний – 16. Параметры системы наблюдений выбраны исходя из длин сейсмических волн, регистрируемых в горных выработках и необходимой вертикальной разрешённости: шаг ПП по скважине 1 м, максимальное удаление ПВ от устья скважины – 30 м, шаг ПВ по кровле выработки – 2 м.

Проведенные исследования позволили получить следующие результаты: 1) скоростную характеристику продольных волн вдоль скважины, 2) скоростное распределение по прямым проходящим волнам в плоскости наблюдений с помощью томографического подхода, 3) временную и

пространственную корреляцию последующих отражённых и преломленных волн, образованных на границах пластов. На основе этих данных произведено сейсмогеологическое расчленение разреза (рисунок 4.48) и увязка отражающих горизонтов с геологическим разрезом скважины.

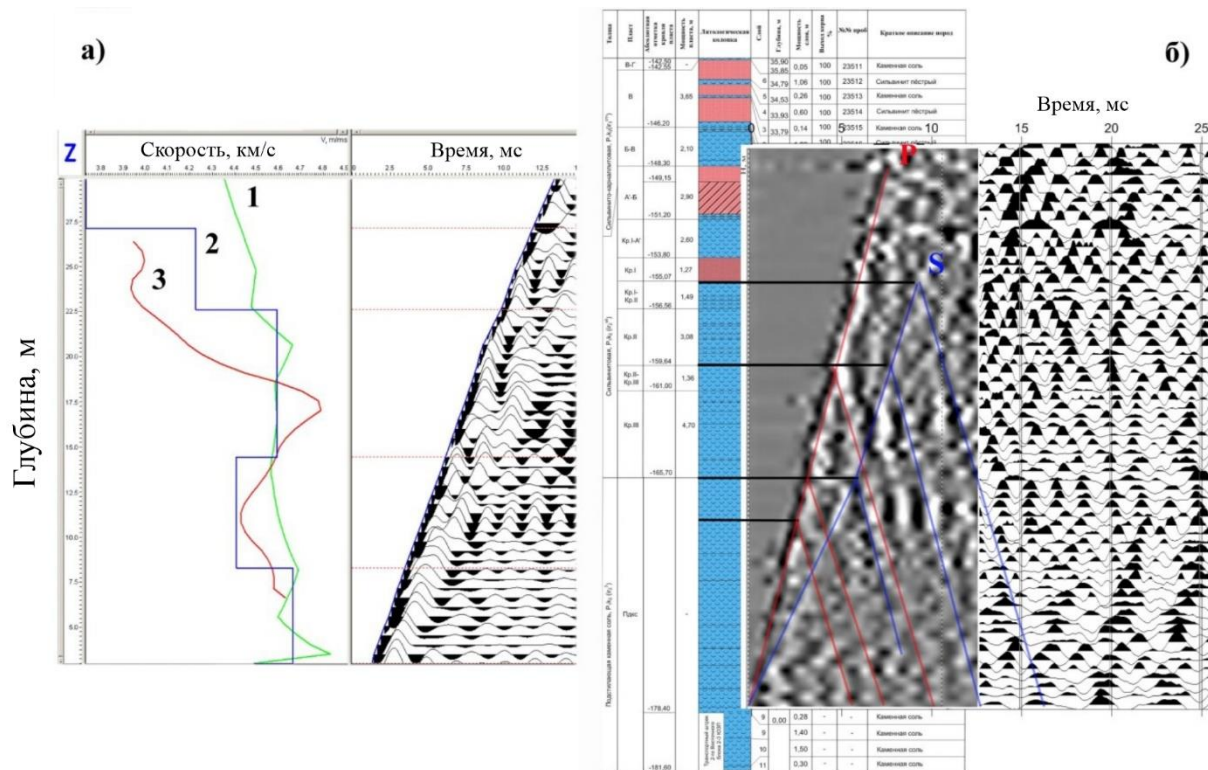


Рисунок 4.48 – Результаты цифровой обработки и интерпретации данных ВСП в подземной скважине: а) скоростная модель околоскважинного пространства (1 – средняя скорость, 2 – расчетная пластовая скорость, 3 – скорость, измеренная по первым вступлениям на постоянной базе); б) выделение и геологическая привязка отражающих горизонтов

Необходимо отметить, что в связи с тонкой слоистостью разреза и незначительной протяженностью линии наблюдений в скважине не представляется возможным построение детальной интервальной скоростной модели по измерениям величины приращения первых вступлений. Получаемые данные представляют некую интегральную оценку фактических значений скоростей. Этого вполне достаточно для коррекции кинематических характеристик регистрируемого поля отражённых волн при исследованиях МОГТ. Более детальное расчленение геологического разреза в пределах

рассматриваемой скважины достигнуто за счёт корреляционных построений последующей сейсмической записи в скважине.

Определение распределения упругих характеристик породного массива в интервале продуктивных отложений выполнено с помощью томографического подхода на прямых продольных волнах, зарегистрированных при выполнении непродольного ВСП (рисунок 4.49).

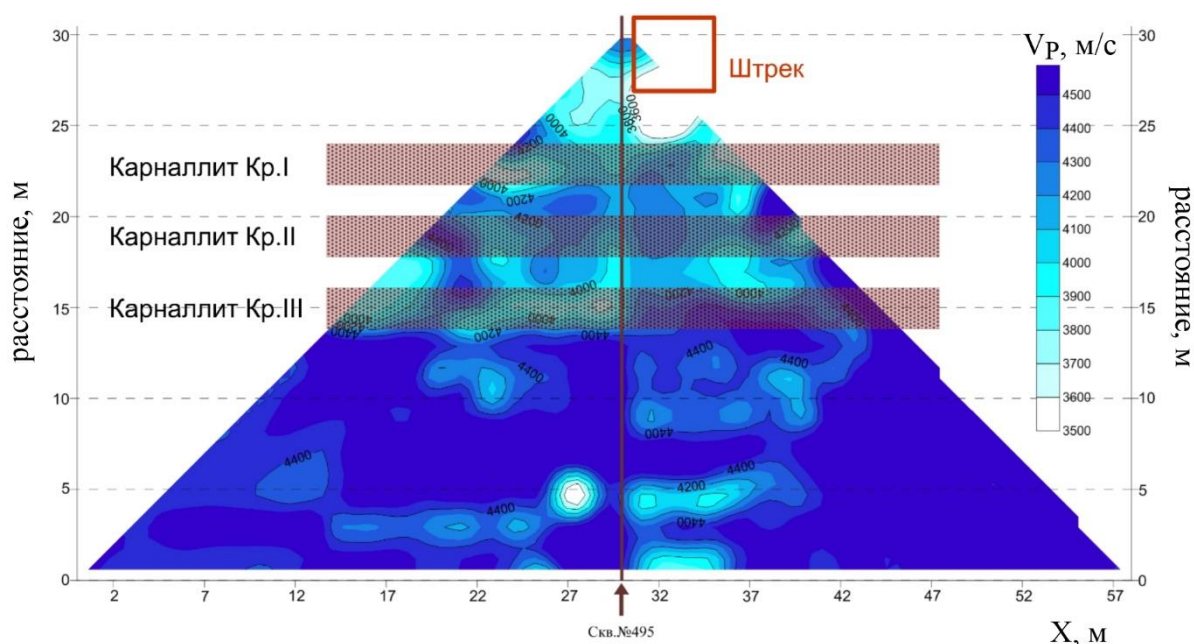


Рисунок 4.49 – Разрез скоростей по данным продольного ВСП.

В целом скоростная модель просвечиваемого массива горных пород согласуется с данными продольного ВСП. Скоростной разрез имеет выраженную слоистую дифференциацию, пространственно согласующуюся с геологическими данными по скважине. Карналлитовая зона, включая интервал замещения каменной солью пласта Кр III, выделяется понижением значений скоростей распространения продольных волн. Отметим, что на разрезе значительным снижением скоростей также проявилось влияние штрека, проходящего выше по горизонту АБ.

Выполненные исследования иллюстрируют возможность выполнения скважинных работ в горных выработках, и оценку состояния ВЗТ, а также уточнение геологического строения продуктивной толщи.

4.4.2. Межскважинное сейсмическое просвечивание в шахте

Следующий пример не связан с соляными месторождениями и приведен для демонстрации методических возможностей межскважинного сейсмического просвечивания в шахтных условиях. Работы выполнены на месторождении полезных ископаемых в Восточной Сибири. Скважины пробурены вертикально вниз из горной выработки, пройденной в карбонатных породах.

Расстояние между скважинами 75 м, глубина 350 м. Шаг между пунктами возбуждения 2 м, между пунктами приема 1 м. На рисунке 4.50 приведена сейсмограмма прямого параллельного просвечивания. Верхняя граница частотного спектра прямых и отраженных волн превышает 2000 Гц (рисунок 4.51), несмотря на значительное расстояние между скважинами. При скоростях 6000 м/с это позволяет регистрировать волны с длинами волн от 3 м.

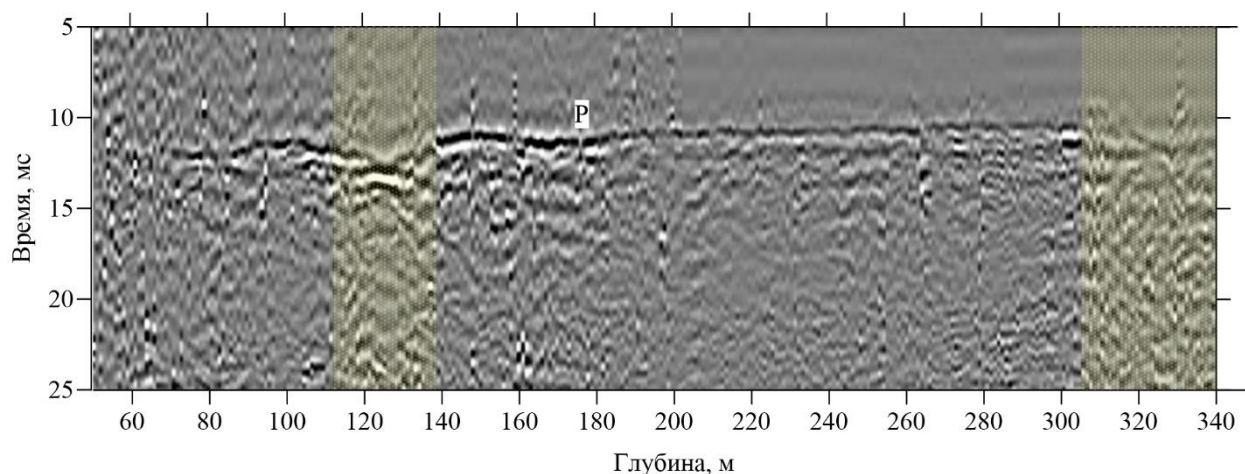


Рисунок 4.50 – Сейсмограмма прямого параллельного просвечивания МСП. Цветом отмечены участки повышения времени прохождения прямой волны Р.

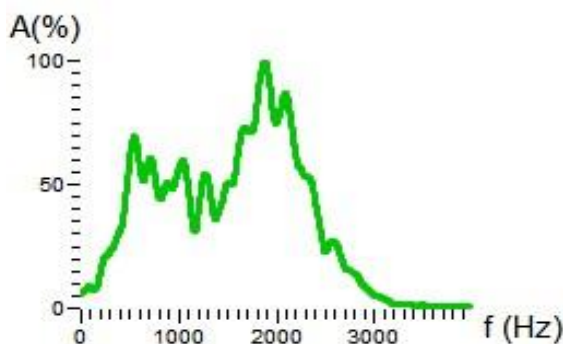


Рисунок 4.51 – Амплитудный спектр полезного сигнала

По данным межскважинной томографии на прямых волнах построено распределение скоростной характеристики в межскважинном пространстве. Полученная скоростная характеристика использована в качестве входных данных для выполнения лучевой миграции отраженных волн (рисунок 4.52), которая также учитывает геометрию скважин, построенную с помощью инклинометрии.

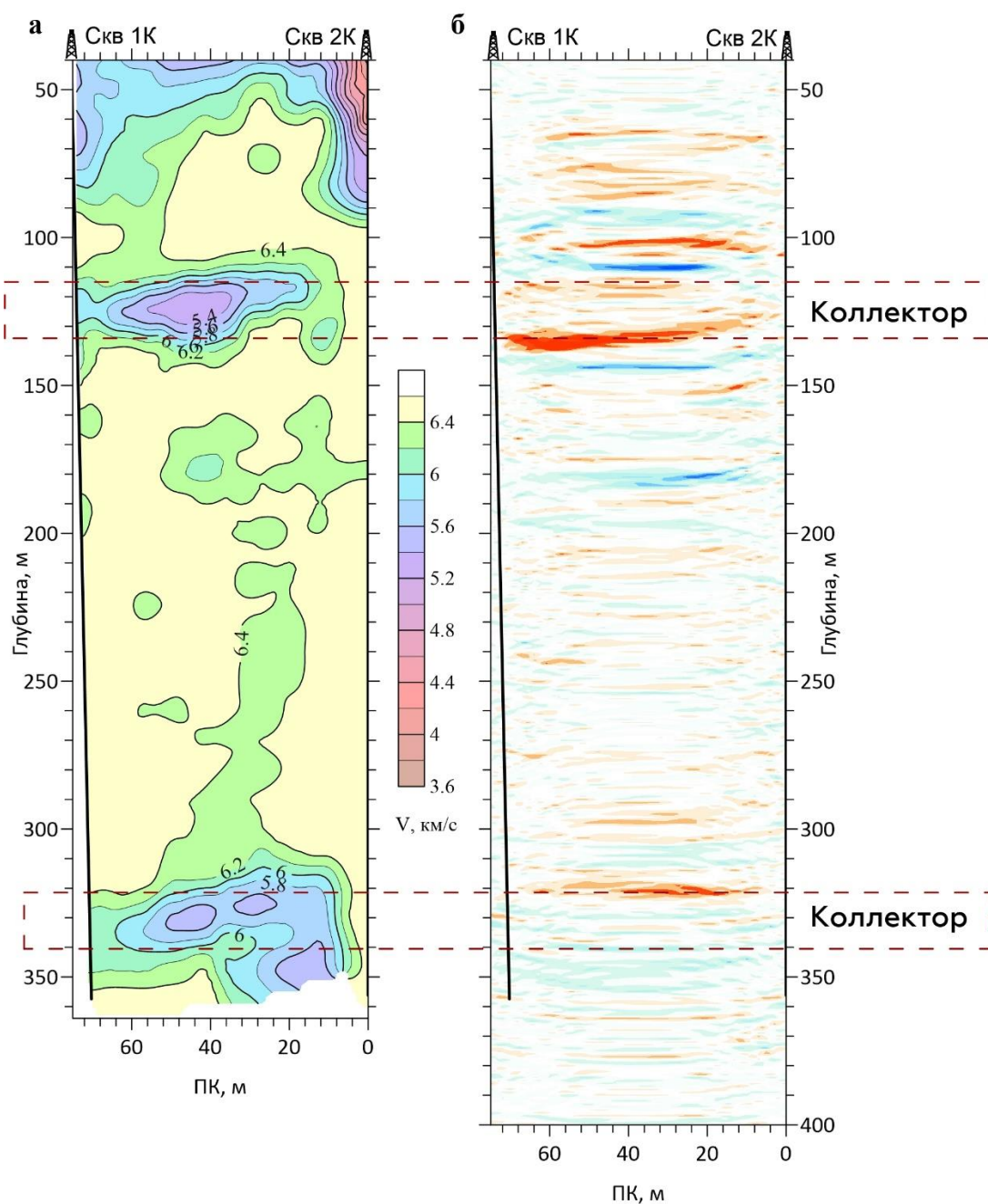


Рисунок 4.52 – Результаты межскважинного просвечивания из горной выработки. а – скоростной разрез; б – глубинный разрез по данным миграции отраженных волн.

Совместная интерпретация полученных данных позволила выделить два интервала разреза, характеризующиеся пониженными значениями скоростей, и границами, ярко проявляющимися на глубинном сейсмическом разрезе. Данные пласты проинтерпретированы как коллекторы с повышенной проницаемостью. Выделенные интервалы разреза с повышенными коллекторскими свойствами могут представлять повышенную опасность при проходке буровзрывным способом.

Полученные результаты демонстрируют возможности шахтного варианта межскважинного просвечивания при построении сейсмогеологических изображений. Плотный высокоскоростной массив обеспечивает широкий частотный состав и распространение сигнала на значительные расстояния, по сравнению с наземными данными, благодаря чему возможно получение глубинных сейсмогеологических разрезов высокого разрешения.

Выводы по главе 4

Приведены наиболее показательные примеры решения горнотехнических задач с помощью скважинных сейсмических исследований.

К наиболее важному типу изучаемых объектов относятся участки, связанные с аварийными ситуациями и последствиями разработки Верхнекамского месторождения солей.

Сеть скважин на аварийном участке позволяет в полной мере реализовать возможности скважинных исследований. Комплексные исследования основаны на изучении различных классов волн, регистрируемых при проведении вертикального сеймопрофилирования и межскважинного сейсмического просвечивания по сети скважин. В результате с помощью трехсторонней томографии на прямых волнах в методе ВСП и МСП по выбранным линиям просвечиваний строятся разрезы скоростей в межскважинном пространстве. Уточнение скоростной модели производится с

помощью головных волн, регистрируемых при МСП. По отраженным волнам строится глубинный сейсмический разрез, который дополняется при необходимости разрезами преломленно-отраженных волн. Выделение вертикальных акустически-контрастных объектов выполняется с помощью совместной интерпретации перечисленных результатов и изучения преломленно-отраженных волн при ВСП. Периодическое совместное выполнение скважинных и наземных наблюдений обеспечивает контроль происходящих техногенно-геологических процессов.

Спроектирована и опробована система мониторинга, включающая распределенную оптоволоконную систему регистрации, смонтированную в четырех кустах скважин, и активный скважинный источник упругих колебаний. Мониторинг выполняется способом межскважинного сейсмического просвечивания. Применение специального кабеля, содержащего прямое и спиральное волокно, позволяет регистрировать прямые, отраженные и преломленные головные волны. На основании сравнения волновых полей локализуются участки изменения упругих свойств массива и дается количественная оценка таких изменений.

Предложенная система мониторинга может быть использована как для контроля сохранности разрабатываемого массива на проблемных участках, так и для мониторинга оснований ответственных зданий и сооружений, расположенных в зонах ускоренных оседаний подработанной территории.

Исследования в инженерно-геологических скважинах в зонах ускоренных оседаний является завершающим этапом инженерных исследований и проектируется с учетом предыдущих наземных сейсмических исследований при наличии аномалий волнового поля. Получаемые скоростные и глубинные сейсмические разрезы по скважинным данным помогают уточнить сейсмогеологическое строение и причину аномалий на глубинных разрезах по наземным исследованиям. Скважинные системы наблюдений расширяют арсенал средств поиска вертикально

ориентированных ослабленных зон за счет применения отраженных и преломленных волн.

Весьма специфическими и в то же время ответственными являются исследования при контроле формирования ледопородного ограждения. Комплекс методов, состоящий из межскважинного просвечивания и скважинного профилирования ОГТ позволяет в процессе замораживания массива оценить степень формирования ЛПО и его толщину. По данным межскважинного просвечивания с помощью прямых волн определяется начальная скоростная модель и упругие свойства разреза. В дальнейшем, по изменению времени прохождения прямых, а после смыкания - и преломленных волн, определяются соотношение замороженной и неизменной части массива. Временной сейсмический разрез, получаемый при скважинном профилировании ОГТ в контрольных скважинах, дает изображение положения границы ЛПО и толщины ледопородного ограждения.

Шахтные скважинные исследования характеризуются более широким спектром регистрируемого сигнала и меньшим коэффициентом затухания. Благодаря этому при одинаковых размерах системы наблюдений разрешающая способность сейсмогеологических изображений при проведении наблюдений в горных выработках будет в несколько раз выше по сравнению с наземными скважинными сейсмическими исследованиями.

Заключение

Волновые поля, регистрируемые при проведении малоуглубинных скважинных сейсмических исследований, содержат различные регулярные классы волн, закономерности распространения которых определяются особенностями сейсмогеологического строения горного массива. На основе анализа и декомпозиции наблюдаемых волновых полей создан комплекс методических и технических подходов, направленный на решение горнотехнических задач за счет изучения отдельных составляющих волнового поля и их совместной интерпретации.

Реализовано получение глубинного сейсмического разреза в межскважинном пространстве и в интервале водозащитной толщи на основе изучения отраженных волн в системе наблюдений межскважинного сейсмического просвечивания. С этой целью выполняется выделение волновых полей восходящих и нисходящих волн, миграция и суммирование по общей глубинной точке. Алгоритм учитывает высококонтрастную границу кровли солей и опробован при различных параметрах систем наблюдений.

Впервые описаны теоретические основы регистрации преломленных головных волн при проведении межскважинного просвечивания. В частности, получены математические зависимости связывающие кажущиеся скорости, определяемые по сейсмограммам, со скоростями во вмещающих породах и в кровле солей. По сравнению с прямыми волнами в методе ВСП, скоростная колонка, полученная с помощью головных волн при МСП, имеет лучшую разрешающую способность за счет существенно более широкого спектра.

В результате анализа лучевых моделей распространения преломленных волн и вторичного волнового поля разработан способ суммирования головных волн, получения поля преломленно-отраженных волн и алгоритм его трансформации к виду глубинного сейсмического разреза. Полученный разрез попадает в зону тени однократно отраженных волн и расширяет угловое и лучевое покрытие.

По такому же принципу, в системе наблюдений ВСП предложен способ обнаружения и пространственной локализации субвертикальных акустически-контрастных границ путем суммирования головных волн.

На основании моделирования объема Френеля головных и отраженных сейсмических волн для различных систем наблюдения выполнены оценки пространственных возможностей и разрешающей способности скважинных сейсмоакустических методик в сейсмогеологических условиях Верхнекамского месторождения солей.

Разработан способ контроля формирования ледопородного ограждения при строительстве шахтных стволов, основанный на совместной интерпретации данных межскважинного просвечивания и скважинного профилирования ОГТ, позволяющий оценивать толщину ледопородного ограждения. При смыкании ледопородного ограждения для оценки сплошности предложено применение рефрагированных волн, распространяющихся по замороженному массиву, который выступает в роли высокоскоростного волновода.

При проведении скважинного профилирования ОГТ, который также можно рассматривать как многоканальный сейсмический каротаж, предложен способ повышения точности определения скоростей продольных волн и гидроволн за счет многоканальной системы наблюдений. Трассы отраженных волн в такой системе наблюдений могут иметь высокую кратность, что повышает надежность выделения акустических границ.

Внедрение системы оптоволоконных акустических датчиков расширяет возможности методических решений при проведении скважинных сейсмических исследований за счет одновременной регистрации прямых, головных и отраженных волн по всей длине во всех приемных скважинах. Установлено, что для проведения межскважинного просвечивания необходимо использовать кабель со спиральным волокном.

Получена аналитическая зависимость амплитудно-частотной характеристики кабеля со спиральным волокном от значения базы измерения,

угла падения волны на кабель и угла намотки волокна в кабеле. Показано, что увеличение угла намотки повышает равномерность амплитудно-частотной характеристики продольных волн как по частотам, так и по углам падения.

Предложена конструкция кабеля для регистрации широкополосных сейсмоакустических сигналов, с помощью которого можно выполнять сейморазведочные исследования и решать обширный круг горнотехнических и инженерных задач.

Спроектирована и опробована система мониторинга аварийного участка на Верхнекамском месторождении солей, включающая распределенную оптоволоконную систему регистрации способом межскважинного просвечивания. Применение специального кабеля, содержащего прямое и спиральное волокно, позволяет регистрировать прямые, отраженные и преломленные головные волны. На основании сравнения волновых полей локализуются участки изменения упругих свойств массива и выполняется их количественная оценка.

В работу не вошли некоторые материалы, работа над которыми на момент написания диссертации не завершена. В основном это касается пассивных сейсмических исследований в скважинах и на поверхности. В частности, оптоволоконные системы регистрации позволяют одновременно выполнять пассивную регистрацию большого числа каналов. Преобразование пассивного сигнала к виду активных наблюдений путем сейсмоакустической интерферометрии позволяет изучать гидроволны в скважинах, которые несут информацию и о кинематическом, и об акустическом состоянии разреза. На поверхности таким же образом возможно выполнение пассивного варианта методики многоканального анализа поверхностных волн Рэлея. При одновременной пассивной регистрации стандартными гидрофонами в соседних скважинах сейсмическая интерферометрия позволяет выделять прямые и головные волны. Методические решения, разработанные для данных классов волн будут справедливы и в пассивном варианте.

Список сокращений

АК	Акустический каротаж
АЧХ	Амплитудно-частотная характеристика
БКРУ, БРУ	Березниковское калийное рудоуправление
ВЗТ	Водозащитная толща
ВКМС	Верхнекамское месторождение солей
ВС	Верхняя соль
ВСП	Вертикальное сейсмопрофилирование
ВСП-ОГТ	Миграция данных ВСП для получения глубинного сейсмического разреза ОГТ
КрI, КрII, КрIII	Сильвинитовые пласты Красный 1, 2, 3
ИГ	Инженерно-геологическая скважина
КТ	Контрольно-термическая скважина
ЛПО	Ледопородное ограждение
ЛРУ	Линия равных удалений
МГ	Маркирующая глина
МОВ	Метод отраженных волн
МСП	Межскважинное просвечивание
ОВСП	Обращенное ВСП
ОГ	Отражающий горизонт
ОГТ	Общая глубинная точка
ОПВ	Общий пункт возбуждения
ОПП	Общий пункт приема
ПВ	Пункт возбуждения
ПКС	Покровная каменная соль
ПП	Пункт приема
ПП	Переходная пачка
ПЦТ	Пестроцветная толща
СКРУ	Соликамское калийное рудоуправление
СЛН	Средняя линия наблюдения
СМТ	Соляно-мергельная толща
ТКТ	Терригенно-карбонатная толща
DAS	Distributed acoustic sensing
TTL	Transistor–transistor logic – транзисторно-транзисторная логика

Список обозначений

a	расстояние от скважины до точки преломления
A	амплитуда
C _j	путь луча в ячейке
d _x	горизонтальный размер отражающей площадки
dX	видимая длина годографа
dy	боковой снос
D	диаметр первой зоны Френеля
D _p D _s	диаграмма чувствительности для продольных и поперечных волн
D _x , D _z	размер выделяемой аномалии
D _л	мощность ЛПО
E, E _x , E _r , E _y , E _z	энергия сигнала и проекции на оси
E ₁	максимальная энергия сигнала среди суммируемых трасс
E _m	минимальная энергия сигнала среди суммируемых трасс
f	частота
h	глубина пункта приема, возбуждения, длина линии возбуждения и приема
H	глубина точки отражения
i, i ₁	первый критический угол
i ₂	второй критический угол
i _k	угол луча головной волны с вертикалью
j	индекс суммирования
k	волновое число
k _a	кажущееся волновое число
l	путь луча от источника до приемника
l _s , l _r	расстояние от точки отражения до S и R
l _z	вертикальная проекция луча
L _x	расстояние между скважинами
G	база приема вдоль волокна
G _н	эффективная база приема
m	оптимальное количество трасс при суммировании
n	количество суммируемых трасс
N	кол-во измерений
N	энергия шума
P, PP, PPP, PPPP	продольные прямая, отраженная, головная, преломленно-отраженная волны
q	коэффициент ослабления сигнала
r	радиус в цилиндрических координатах
r _c	радиус кабеля
R	приемник

R_E	эффективный радиус изгиба волокна
R_{SN}, R_{FO}, R_H	отношение сигнал шум оптоволоконных датчиков и гидрофонов
S	источник
S	энергия сигнала
t	время
T	период
t_{an}	табличный коэффициент
u	смещение
V_1	скорость в верхней толще
V_2	скорость в нижней высокоскоростной толще
V_k	кажущаяся скорость
V_P, V_S, V_L	скорость продольных, поперечных и гидроволн
w	коэффициент удлинения волокна
x	горизонтальная координата вдоль профиля
X	координата точки отражения
X_0	радиус мертвой зоны
y	горизонтальная координата поперек профиля
z	координата глубины
Z	глубина точки отражения
$Z_{ПВ}$	глубина ПВ
$Z_{ПП}$	глубина ПП
α	<i>глава 2:</i> угол наклона вертикальной границы
α	<i>глава 3:</i> угол падения луча на волокно
β	угол между лучом и нормалью к плоскости отражения
Γ	угол отраженной волны со скважиной
γ	угол падения волны на границу
ε	погрешность измерений
η	отношение энергий E_1 и E_m
θ	угол намотки волокна в кабеле
λ	длина волны
ρ	плотность
σ	стандартное отклонение
φ	<i>глава 2:</i> угол падения границы в плоскости $x-z$
φ	<i>глава 3:</i> угол падения волны на малый участок волокна
ϕ	угол в цилиндрических координатах
ψ	угол падения пласта в плоскости $y-z$
Ω	объем первой зоны Френеля

Список литературы

Акуленко, А. С. Опыт применения волоконно-оптических распределенных систем при выполнении работ ВСП-НВСП / А. С. Акуленко, Т. Р. Ганиев, А. В. Горшенин, Ю. В. Воробьев // Геофизика. – 2023. – № 6. – С. 22-27.

Алексеев, Р. И. Руководство по вычислению и обработке результатов количественного анализа. / Р. И. Алексеев, Ю. И. Коровин // М: Атомиздат. – 1972. – 72 с.

Архипов, А. Г. Сейсмоакустическая диагностика состояния массивов естественных и искусственных грунтов // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в России. — 2015. — С. 162–166.

Ахметсафин, Р. Д. Вычисление дисперсионного сембланса для волнового акустического каротажа / Р. Д. Ахметсафин, Р. З. Ахметсафина // Геофизические исследования. – 2017. – Т. 18, № 4. – С.57-70.

Ахметсафин, Р. Д. О возможности многоэлементного акустического каротажа для подавления эффекта "звнящей" колонны / Р. Д. Ахметсафин // Геофизика. – 2009. – № 1. – С. 44-47.

Бабич, В.М. Головная волна интерференционного типа (волна Булдырева) и соображения локальности / В. М. Бабич, А. А. Мацковский // Зап. научн. сем. ПОМИ. – 2015. – № 438. – С. 36–45.

Бабкин, А. И. Апробация компактного механизированного ударного источника сейсмических волн для малоглубинных исследований в условиях вечной мерзлоты / А. И. Бабкин // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сборник научных трудов. Том Выпуск 14. – Пермь: Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, 2016. – С. 218-220.

Бабкин, А. И. Шахтная сейсмоакустика по методике многократных перекрытий (на примере Верхнекамского месторождения калийных солей) : специальность 25.00.16 "Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр" : диссертация на

соискание ученой степени кандидата технических наук / Бабкин Андрей Иванович. – Пермь, 2001. – 157 с.

Байбакова, Т. В. Определение степени разрушения породного массива по сейсморазведочным данным / Т. В. Байбакова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № 12. – С. 236-240.

Барях, А. А. Геомеханическая оценка интенсивности деформационных процессов над затопленным калийным рудником / А. А. Барях, Н. А. Самоделкина // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 4. – С. 33-46.

Барях, А. А. Горнотехнические аварии: затопление Первого Березниковского калийного рудника / А. А. Барях, А. Е. Красноштейн, И. А. Санфиров // Вестник Пермского научного центра УрО РАН. – 2009. – № 2. – С. 40-49.

Барях, А. А. Калийная промышленность России: проблемы рационального и безопасного недропользования / А. А. Барях, Э. В. Смирнов, С. Ю. Квиткин, Л. О. Тенисон // Горная промышленность. – 2022. – № 1. – С. 41-50. – DOI 10.30686/1609-9192-2022-1-41-50.

Барях, А. А. Мониторинг последствий затопления калийного рудника / А. А. Барях, И. А. Санфиров, Р. А. Дягилев // Горный журнал. – 2013. – № 6. – С. 34-39.

Барях, А. А. О механизме формирования карстовых провалов на земной поверхности / А. А. Барях, А. К. Федосеев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2011. – № 4. – С. 12-22. – EDN ONWUPP.

Барях, А. А. Разрушение водоупорных толщ при ведении крупномасштабных горных работ. Ч. I / А. А. Барях, Н. А. Самоделкина, И. Л. Паньков // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2012. – № 5. – С. 3-14.

Барях, А. А. Сейсмо-геомеханический прогноз состояния водозащитной толщи на калийных рудниках / А. А. Барях, И. А. Санфиров, А. К. Федосеев [и

др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 6. – С. 10-22.

Барях, А. А. Теоретическое обоснование условий образования провалов на земной поверхности после аварийного затопления калийных рудников / А. А. Барях, С. Ю. Девятков, Н. А. Самоделкина // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – № 1. – С. 50-61.

Болгаров, А. Г. Межскважинная сейсмическая томография для решения инженерно-геологических задач / А. Г. Болгаров, Ю. В. Рослов // Технологии сейсморазведки. – 2009. – № 1. – С. 105-111.

Бреховских, Л.М. Волны в слоистых средах. – М.: Наука, 1973. – 343 с.

Бураго, Н. А. Дисперсия трубной и лэмбовской волн, регистрируемых при акустическом каротаже. / Бураго Н. А., Ибатов А. С., Крауклис П. В., Крауклис Л. А. // Интерференционные волны в слоистых средах. I. – 1980. – Зап. научн. сем. ЛОМИ. – Т. 99, Л.: «Наука», Ленинград. отд. – С. 19–27.

Вартанов, А. З. Физико-технический контроль и мониторинг при освоении подземного пространства городов. — М.: Горн. книга, 2013. – 548 с.

Владов, М. Л. Сейсмоакустические многоволновые исследования в водонаполненных скважинах с помощью электроискрового источника упругих волн : специальность 25.00.10 "Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых" : диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук / Владов Михаил Львович. – Москва, 2003. – 277 с.

Владов, М. Л. Томографические просвечивания при больших межскважинных расстояниях: негативные факторы / М. Л. Владов, В. А. Стручков, М. С. Судакова, Д. В. Шмурак // Инженерные изыскания. – 2020. – Т. 14, № 2. – С. 42-51.

Владов, М. Л. Использование гидроволн при восстановлении скоростного разреза сдвиговых волн по данным скважинной томографии / Владов М. Л., Калинин А. В., Шалаева Н. В. // Разведка и охрана недр. – 2002. – № 1. – С. 46–48.

Воюцкий, В. С. К проблеме сейсмокаротажа // Бюллетень нефтяной геофизики. – 1937. – №4. – С. 103 – 117.

Вязниковцев, А.А. Опыт применения миграции данных межскважинного просвечивания в рамках инженерно-геофизических изысканий / А.А. Вязниковцев, А.Н. Ошкин // Инженерная и рудная Геофизика 2023: Сборник материалов 19-й научно-практической конференции и выставки, Санкт-Петербург, 15–19 мая 2023 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "ЕАГЕ ГЕОМОДЕЛЬ", 2023. – С. 407-413.

Гайнанов, В. Г. Комплексное использование технологий скважинных сейсмических наблюдений при инженерно-геологических исследованиях / В. Г. Гайнанов, А. Г. Скворцов // Разведка и охрана недр. – 2006. – № 12. – С. 30-32.

Галушкин, И. В. Межскважинное сейсмическое просвечивание - важный инструмент инженерно-геологических изысканий на площадках строительства объектов повышенной ответственности / И. В. Галушкин, С. У. Кухмазов, Н. А. Рагозин // Инженерные изыскания. – 2021. – Т. 15, № 1-2. – С. 62-75.

Гальперин, Е.И. Вертикальное сейсмическое профилирование. М.: Недра, 1982. – 344 с.

Гамбурцев, Г.А. Корреляционный метод преломленных волн / Г.А. Гамбурцев, Ю.В. Ризниченко, И.С. Берзон [и др.] // Руководство для инженеров-сейсморазведчиков. – М.: изд-во АН СССР. – 1952. – 240 с.

Глебов, С. В. Обоснование рациональных комплексов геофизических исследований водозащитной толщи на месторождениях водорастворимых руд (на примере Верхнекамского месторождения калийных солей) : специальность 25.00.16 "Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Глебов Сергей Валерьевич. – Пермь, 2006. – 156 с.

Голик, В. И. Геофизический мониторинг подземного блокового выщелачивания руд / В. И. Голик, Ю. В. Дмитрак // Геофизика. – 2020. – № 4. – С. 75-79.

Гольдин, С. В. Введение в геометрическую сейсмику : учеб. пособие : / С. В. Гольдин // Новосиб. гос. ун-т, Геол.-геофиз. фак.. – Новосибирск : [НГУ], 2005. – 263 с. – ISBN 5-94356-295-8.

Горбуленко, В. В. Волоконно-оптическая система мониторинга "Дунай" / В. В. Горбуленко, А. В. Леонов, К. В. Марченко, В. Н. Трещиков // Фотон-экспресс. – 2014. – № 5(117). – С. 12-15.

Горгун, В. А. Дисперсионный метод определения скоростей по данным многоэлементного волнового акустического каротажа / В. А. Горгун, Э. В. Утемов, В. Е. Косарев // Георесурсы. – 2011. – № 6(42). – С. 44-47.

Девятков, С. Ю. Об образовании провалов на участке аварии 1995 года на руднике СКРУ-2 / С. Ю. Девятков // Горное эхо. – 2019. – № 2(75). – С. 40-45. – DOI 10.7242/echo.2019.2.9.

Джиноридзе, Н. М. Петротектонические основы безопасной эксплуатации Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей / Н. М. Джиноридзе // СПб-Соликамск. – 2000. – 400 с.

Егоров, А. А. Полноволновая инверсия данных вертикального сейсмического профилирования для решения задач сейсмического мониторинга : специальность 25.00.10 "Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Егоров Антон Алексеевич, 2019. – 113 с.

Завалишин, Б. Р. Измерение и использование радиуса первой зоны Френеля в сейморазведке / Б. Р. Завалишин // Геофизика. – 2008. – № 5. – С. 3-7.

Иудин, М. М. Обеспечение безопасности устойчивости ствола при оттаивании ледопородного ограждения / М. М. Иудин // Вестник Якутского государственного университета. – 2009. – Т. 6, № 1. – С. 46-50.

Калинин, А.В. Межскважинная томография в акустическом диапазоне частот. / А.В. Калинин, Л.М. Кульницкий, М.Л. Владов, Н.В. Шалаева // Разведка и охрана недр. – 2002. № 1. – С. 41–46.

Калинин, А.В. Электроискровой источник упругих волн для целей наземной сейсморазведки / Калинин, А.В., Калинин В.В., Владов М.Л. [и др.] // М.: МГУ. – 1989. – 193 с.

Калинина, Т. А. О механизме образования брекчиевых пород в кровле соляной залежи Верхнекамского месторождения солей / Т. А. Калинина, Д. Е. Трапезников // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского. – 2016. – № 19. – С. 372-378.

Караев, Н. А. Оценка методами математического и физического моделирования возможности использования обменных рассеянных волн для прямого обнаружения и характеристики систем макротрещин / Н. А. Караев, В. Б. Левянт, И. Б. Петров [и др.] // Технологии сейсморазведки. – 2015. – № 1. – С. 22-36.

Караев, Н. А. Становление и пути развития сейсморазведки нетрадиционных моделей верхней части коры и возможности современных сейсмоакустических технологий в руднопоисковых провинциях / Н. А. Караев // Технологии сейсморазведки. – 2017. – № 4. – С. 5-36.

Карус, Е. В. Межскважинное прозвучивание / Карус, Е. В., Кузнецов О. Л., Файзуллин И. С. // М.: Недра, 1986. – 149 с.

Кашубин, С.Н. Поперечные и обменные волны при глубинных сейсмических исследованиях на акваториях / под ред. С. Н. Кашубина, О. В. Петрова. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2019. – 155 с.

Квасов, И. Е. Численное исследование волновых процессов в пористой среде с использованием сеточно-характеристического метода / И. Е. Квасов, В. Б. Левянт, И. Б. Петров // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2016. – Т. 56, № 9. – С. 1645-1656.

Квасов, И. Е. Численное моделирование волновых процессов в геологических средах в задачах сейсморазведки с помощью

высокопроизводительных ЭВМ / И. Е. Квасов, И. Б. Петров // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2012. – Т. 52, № 2. – С. 330.

Кислов, К. В. Обзор перспективных использований распределенного акустического зондирования / К. В. Кислов, В. В. Гравиров // Наука и технологические разработки. – 2023. – Т. 102, № 4. – С. 4-37. – DOI 10.21455/std2023.4-1.

Кислов, К. В. Распределенное акустическое зондирование: новый инструмент или новая парадигма / К. В. Кислов, В. В. Гравиров // Сейсмические приборы. – 2022. – Т. 58, № 2. – С. 5-38. – DOI 10.21455/si2022.2-1.

Кондратьев, О. К. Разрешающая способность сейсморазведки МОВ-ОГТ / О. К. Кондратьев // Геофизика. – 2006. – № 2. – С. 3-12.

Коротков, И. П. Особенности обработки данных многоволновой сейсморазведки / И. П. Коротков, В. М. Кузнецов, Г. А. Шехтман, А. В. Череповский // Технологии сейсморазведки. – 2014. – № 2. – С. 51-69.

Кравцов, Ю. А. Геометрическая оптика неоднородных сред. / Ю.А. Кравцов, Ю.И. Орлов // М.: Наука, 1980а. – 306 с.

Кравцов, Ю. А. Границы применимости метода геометрической оптики и смежные вопросы / Ю.А. Кравцов, Ю.И. Орлов // Усп. физ. Наук, 1980б. – Т. 132, №3. – С. 475-496.

Кузнецов, В. М. Методика наблюдений в многоволновой сейсморазведке / В. М. Кузнецов, Г. А. Шехтман, А. В. Череповский // Технологии сейсморазведки. – 2013. – № 2. – С. 37-59.

Кулаков, И. Ю. Сейсмическая томография вулканов Камчатки / И. Ю. Кулаков // Геология и геофизика. – 2022. – Т. 63, № 11. – С. 1455-1499.

Левин, Л. Ю. Оптимизация процессов формирования ледопородного ограждения при сооружении шахтных стволов / И. И. Головатый, Л. Ю. Левин, О. С. Паршаков, Д. А. Диулин // Горный журнал. – 2018. – № 8. – С. 48-53.

Ленский, В. А. Горизонтальная разрешающая способность скважинной сейсморазведки по результатам моделирования. – М., 1988. – 36 с. – Деп. в ВИНТИ 03.03.88 №1790-B88.

Ленский, В. А. Современное состояние скважинной сейсморазведки (ВСП) в России / В. А. Ленский, А.С. Жужель, Т.Р. Шарафутдинов // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2019. – № 1. – С. 29-36.

Ленский, В. А. Точность стратиграфической привязки по синтетическому акустическому и плотностному каротажу / В. А. Ленский, А. С. Жужель // Геология нефти и газа. – 2021. – № 4. – С. 103-111.

Ленский, В. А. Форма и размеры зоны Френеля в скважинной сейсморазведке. – М., 1987. – 23 с. – Деп. в ВИНТИ 16.09.87, № 6694-B87.

Ли, В. О. Анализ эффективности 2D сейсморазведки методом ОГТ при изучении приповерхностной части разреза / В. О. Ли, М. Л. Владов // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. – 2012. – № 3. – С. 52-60.

Лисин, В. П. Исследование потенциально опасных зон ускоренного оседания грунтовой толщи шахтных полей методами наземной и скважиной сейсморазведки / В. П. Лисин, А. В. Чугаев, И. А. Санфиров // Инженерная и рудная геофизика 2018 – 14-я конференция и выставка, Алматы, 23–27 апреля 2018 года. – 2018.

Маловичко, А. А. Соликамское землетрясение 5 января 1995 года ($M_s=4.2$) / А. А. Маловичко, Д. А. Маловичко, А. К. Кустов // Землетрясения Северной Евразии в 1995 году : Сборник научных трудов. – Москва : Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геофизическая служба Российской академии наук. – 2001. – С. 163-169.

Маловичко, Д. А. О техногенной природе Соликамского землетрясения / Д. А. Маловичко // Стратегия и процессы освоения георесурсов : Материалы научной сессии Горного института УрО РАН по результатам НИР в 2003 году. – Пермь : Горный институт Уральского отделения Российской академии наук. – 2004. – С. 101-104.

Мацковский, А. А. Головная волна интерференционного типа в задаче дифракции волн точечного источника на неоднородной полуплоскости / А. А. Мацковский // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2015. – Т. 55, № 11. – С. 1904.

Мацковский, А. А. О волновых фронтах головной волны Булдырева и волн шепчущей галереи / А. А. Мацковский // Записки научных семинаров Санкт-Петербургского отделения математического института им. В.А. Стеклова РАН. – 2014. – Т. 426, № 44. – С. 140-149.

Мешбей, В. И. Сейсморазведка методом общей глубинной точки. М.: Недра. – 1973. – 152 с.

Мусатов, И. В. Построение трехмерной скоростной модели на основе совместного анализа данных ВСП, наземной сейсморазведки и ГИС / И. В. Мусатов, А. В. Новокрестьянин, В. П. Торгашов // Технологии сейсморазведки. – 2016. – № 1. – С. 5-13.

Новиков, Е. А. Использование закономерностей акустической эмиссии грунтов для определения степени их промерзания / Е. А. Новиков, В. Л. Шкурятник, Р. О. Ошкин // Криосфера Земли. – 2016. – Т. 20, № 1. – С. 99-103.

Орре, В. Обнаружение мелких разломов и трещин с помощью сейсмических данных / В. Орре, Д. Астратти, Таха Нассер Али Аль Дайнини [и др.] // Нефтегазовое обозрение. – 2012. – №2. – С. 36.

Островский, А. Е. Измерение скорости распространения упругих колебаний на малых базах // Докл. АН СССР. – 1937. – т. XVII, №7. – С. 1051-1068.

Ошкин, А. Н. Возможности и перспективы сейсмоакустических исследований скважин / А. Н. Ошкин, Г. Ф. Хуснуллина // Технологии сейсморазведки. – 2015. – № 1. – С. 92-98. – DOI 10.18303/1813-4254-2015-1-92-98.

Ошкин, А. Н. Межскважинное сейсмическое просвечивание -опыт, методология, аппаратура / А. Н. Ошкин, Р. Ю. Ермаков, Н. А. Рагозин, В. И.

Игнатъев // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2016. – Т. 57, № 3. – С. 37-47.

Ошкин, А. Н. Опыт применение малоуглубинных скважинных сейсмоакустических исследований для изучения строения и состояния массива горных пород / А. Н. Ошкин, В. И. Игнатъев, А. И. Коньков // ГеоЕвразия 2018. Современные методы изучения и освоения недр Евразии : Труды Международной геолого-геофизической конференции, Москва, 05–08 февраля 2018 года. – Москва: ООО "ПолиПРЕСС", 2018. – С. 669-674.

Патент № 2439620 С1 Российская Федерация, МПК G01V 1/116. импульсный пороховой источник упругих колебаний : № 2010124548/28 : заявл. 15.06.2010 : опубл. 10.01.2012 / И. А. Санфиоров, А. Г. Ярославцев, А. Е. Ахматов [и др.]

Патент № 2706910 С1 Российская Федерация, МПК G01V 1/00, G01V 1/28, G01V 1/30. Способ контроля толщины ледопородного ограждения при строительстве шахтных стволов : № 2019109327 : заявл. 29.03.2019 : опубл. 21.11.2019 / И. А. Санфиоров, А. Г. Ярославцев, А. И. Бабкин, А. В. Чугаев.

Патент № 2760889 С1 Российская Федерация, МПК G01V 1/40, G01V 1/28, G01V 1/30. Способ скважинной сейсмической разведки: № 2020141106: заявл. 14.12.2020: опубл. 01.12.2021 / А. В. Чугаев, И. А. Санфиоров, А. И. Бабкин, К. Ю. Томилов.

Патент № 2809469 С1 Российская Федерация, МПК G01V 1/42, G01D 5/26. Способ и система сейсмоакустического контроля массива горных пород: № 2023109620: заявл. 14.04.2023: опубл. 12.12.2023 / А. В. Чугаев, И. А. Санфиоров, А. И. Кузнецов, Р. А. Богданов.

ПБ 07-436-02 «Правила промышленной безопасности при освоении месторождений нефти на площадях залегания калийных солей» Нормативные документы по вопросам охраны недр и геолого-маркшейдерского контроля. – №5. – 2002.

Петров, И. Б. Применение сеточно-характеристического метода в решении прямых задач сейсморазведки трещиноватых пластов (обзорная

статья) / И. Б. Петров, М. В. Муратов // Математическое моделирование. – 2019. – Т. 31, № 4. – С. 33-56. – DOI 10.1134/S0234087919040038.

Пименова, А. В. Селекция волн при акустическом каротаже на основе преобразования Радона / А. В. Пименова, С. В. Белов, А. В. Шумилов // Геофизика. – 2015. – № 5. – С. 19-22.

Потемка, А. К. Эффективность мультимодальных сейсмоакустических наблюдений для изучения разреза четвертичных отложений в северной части Карского моря / А. К. Потемка, М. Ю. Токарев, И. А. Буланова [и др.] // Геофизика. – 2023. – № 2. – С. 2-9.

Применение сейсмоакустических методов в гидрогеологии и инженерной геологии / под ред. Н. Н. Горяинова. — М.: Недра, 1992. — 264 с.

Санфиров, И. А. Выделение малоглубинных природно-техногенных неоднородностей породного массива в различных реализациях интерференционного поля отраженных волн / И. А. Санфиров, А. Г. Ярославцев, А. А. Жикин, К. Б. Фатькин, Т. В. Байбакова // Геофизика. – 2017. – № 5. – С. 56-63.

Санфиров, И. А. Горнотехнические приложения малоглубинной скважинной сейсморазведки / И. А. Санфиров, А. В. Чугаев, А. И. Бабкин [и др.] // Геофизика. – 2018. – № 5. – С. 24-30.

Санфиров, И. А. Комплексные методические решения в шахтной сейсмоакустике / И. А. Санфиров, А. И. Бабкин, А. Г. Ярославцев // Геофизика. – 2014. – № 5. – С. 10-15.

Санфиров, И. А. Контроль состояния горного массива методами многоволновой шахтной сейсморазведки / И. А. Санфиров, А. И. Бабкин, А. П. Сальников // Горный вестник. – 1998. – № 6. – С. 94–99.

Санфиров, И. А. Малоглубинная сейсмостратиграфия / И. А. Санфиров, А. Г. Ярославцев, А. И. Бабкин [и др.] // Геофизика. – 2016. – № 5. – С. 11-18.

Санфиров, И. А. Применение малоглубинной сейсморазведки отраженными волнами для оценки состояния околоствольного массива / И. А.

Санфи́ров, А. Г. Ярославцев, А. И. Бабкин, Г. Ю. Прийма, А. В. Чугаев // Разведка и охрана недр. – 2005. – № 12. – С. 31-33.

Санфи́ров, И. А. Развитие интерпретационных возможностей сейсморазведочных исследований при освоении месторождений водорастворимых полезных ископаемых / И. А. Санфи́ров, А. А. Жи́кин, Р. А. Богданов, К. Б. Фатькин // Горный журнал. – 2021. – № 4. – С. 28-33.

Санфи́ров, И. А. Сейсмоакустическое профилирование МОГТ в скважинах / И. А. Санфи́ров, А. И. Бабкин, Т. В. Байбакова // Инженерная геофизика 2017 : Труды конференции: электронное издание, Кисловодск, 24–28 апреля 2017 года. – Кисловодск: Европейская ассоциация геоученых и инженеров, 2017. – С. 4.

Санфи́ров, И. А. Сейсморазведочные исследования условий разработки калийной залежи / И. А. Санфи́ров, А. И. Бабкин, А. Г. Ярославцев [и др.] // Геофизика. – 2011. – № 5. – С. 53-58.

Санфи́ров, И.А. Идеи А.К. Урупова в скоростном анализе данных малоглубинной сейсморазведки / И. А. Санфи́ров, А. А. Жи́кин, А. Г. Ярославцев, А. И. Бабкин // Геофизика. – 2013. – № 5. – С. 12-16.

Санфи́ров, И.А. Картирование локальных нарушений водозащитной толщи комплексом многоуровневных сейсморазведочных исследований различной размерности / И. Санфи́ров, А. Бабкин, А. Ярославцев [и др.] // 15-я конференция и выставка «Инженерная и горная геофизика-2019», Геленджик 2019, Геленджик, 22–26 апреля 2019 года. – Геленджик, 2019. – С. 485-495.

Санфи́ров, И.А. Контроль формирования ледопородного ограждения шахтного ствола комплексом наземных и скважинных сейсморазведочных методов / И. А. Санфи́ров, А. Г. Ярославцев, А. В. Чугаев [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2020. – № 3. – С. 34-46.

Санфи́ров, И.А. Сейсморазведочные исследования условий разработки калийной залежи / И. А. Санфи́ров, А. И. Бабкин, А. Г. Ярославцев [и др.] // Геофизика. – 2011. – № 5. – С. 53-58.

- Сейсмическая томография / Под ред. Г. Нолета. М.: Мир, 1990. – 416 с.
- Сейсмические волновые поля в зонах разломов: Сб. статей под ред. А.В. Николаева. – М.: Наука. – 1978. – 166 с.
- Селетков, И.А. Изучение трещиноватых коллекторов от сейсморазведки до гидродинамической модели / И. А. Селетков, С. В. Ладейщиков, А. П. Фадеев, А. Л. Южаков // Геофизика. – 2020. – № 5. – С. 20-25.
- Силаев, В. А. Сейсмическое торпедирование глубоких скважин при детальном изучении нефтеперспективных объектов // Региональная разведочная и промысловая геофизика / Обзор ВНИИ экономики минерального сырья и геологоразведочных работ (ВИЭМС). М., 1983. 60 с.
- Силаев, В. А. Скважинная сейсморазведка по методу глубинного сейсмического торпедирования. Пермь: ПГНИИУ, 2018, 220 с. [Электронное издание] URL: <https://elis.psu.ru/node/496989> (Дата обращения: 12.08.2024)
- Скворцов, А. Г. Сейсмические критерии идентификации мерзлого состояния горных пород / А. Г. Скворцов, М. Р. Садуртдинов, А. М. Царев // Криосфера Земли. – 2014. – Т. 18, № 2. – С. 83-90.
- Судакова, М. С. Особенности обработки данных вертикального сейсмического профилирования морских малоуглубинных скважин с волоконно-оптическими распределенными системами / М. С. Судакова, М. В. Белов, А. О. Понимаскин [и др.] // Геофизика. – 2021. – № 6. – С. 110-118.
- Табаков, А. А. Методика и некоторые результаты обработки данных МОГ и 3D ВСП / А. А. Табаков, К. В. Баранов, Н. В. Рыковская, А. В. Копчиков // Технологии сейсморазведки. – 2006. – № 02. – С. 8–13.
- Тарасов, В. В. Обзор аварийных ситуаций, возникших на Верхнекамском калийном месторождении при проходке шахтных стволов / В. В. Тарасов, В. С. Пестрикова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 5. – С. 23-29.
- Твердохлебов, Д. Н. Практика использования 1ой зоны Френеля в сейсморазведке / Д.Н. Твердохлебов, Е.К. Королев // 5-я международная

научно-практическая конференция «Инженерная и рудная геофизика 2009». – EAGE. – 2009.

Теплицкий, В.А. Применение скважинной сейсморазведки для изучения структур в нефтегазоносных районах. – М.: Недра, 1973. – 130 с.

Тихоцкий, С. А. Исследование возможности создания сейсмических датчиков на основе оптического волокна с заданной диаграммой направленности / С. А. Тихоцкий, Е. Чулков // BalticPetroModel-2022. Петрофизическое моделирование осадочных пород : труды VI Балтийской научно-практической конференции, Петергоф, 19–21 сентября 2022 года / ООО «ГеоЕвразия». – Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2022. – С. 47-51.

Тулапин, А. В. Алгоритм пространственного сглаживания скоростной модели: принцип, результаты и сравнение с данными DAS-ВСП / А.В. Тулапин, А.Г. Длугач, С.И. Рокос // Инженерная и рудная Геофизика 2023 : Сборник материалов 19-й научно-практической конференции и выставки, Санкт-Петербург, 15–19 мая 2023 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "ЕАГЕ ГЕОМОДЕЛЬ". – 2023. – С. 775-784.

Уайт, Дж. Э. Возбуждение и распространение сейсмических волн. М.: Недра, 1986. – 261 с.

Урупов, А. К. Изучение скоростей в сейсморазведке. М.: Недра, 1966. – 225 с.

Чайковский, И. И. Основные этапы формирования тектонических нарушений в водозащитной толще Верхнекамского калийного месторождения / И. И. Чайковский // Горный журнал. – 2008. – № 10. – С. 41-44.

Чайковский, И. И. Типизация основных механизмов соляной тектоники мира: Верхнекамское месторождение как эталон многоэтапного гравитационного скольжения / И. И. Чайковский // Вестник Пермского научного центра УрО РАН. – 2013. – № 1. – С. 18-37.

Чугаев, А. В. Амплитудно-частотный отклик распределенного акустического сенсора DAS со спиральной намоткой волокна / А. В. Чугаев,

М. В. Тарантин // Горные науки и технологии. – 2023. – Т. 8, № 1. – С. 13-21. – DOI 10.17073/2500-0632-2022-06-10.

Чугаев, А. В. Межскважинные сейсмические исследования при изучении водозащитной толщи на аварийном участке Верхнекамского месторождения калийных солей / А. В. Чугаев // Горное эхо. – 2019. – № 4(77). – С. 92-100. – DOI 10.7242/echo.2019.4.20.

Чугаев, А. В. Оценка возможностей распределенной оптоволоконной системы регистрации со спиральным волокном при проведении межскважинного сейсмоакустического просвечивания / А. В. Чугаев, А. И. Кузнецов // Приборы и техника эксперимента. – 2023. – № 5. – С. 167-173. – DOI 10.31857/S0032816223050087.

Чугаев, А. В. Петрофизические возможности скважинного профилирования по методу общей глубинной точки / А. В. Чугаев, И. А. Санфиоров, К. Ю. Томилов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 11. – С. 108-117.

Чугаев, А. В. Поиск субвертикальных зон трещиноватости с использованием головных волн в методе вертикального сейсмопрофилирования / А. В. Чугаев, И. А. Санфиоров, А. И. Бабкин, К. Ю. Томилов // Инженерная и рудная геофизика 2021 : Материалы 17-й научно-практической конференции и выставки, Геленджик, 26–30 апреля 2021 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "ЕАГЕ ГЕОМОДЕЛЬ", 2021. – С. 7.

Чугаев, А. В. Получение сейсмических изображений в методе межскважинного просвечивания на основании углубленного анализа волнового поля / А. В. Чугаев, И. А. Санфиоров, М. В. Тарантин [и др.] // Инженерная и рудная геофизика 2022 : Сборник материалов 18-ой научно-практической конференции и выставки, Геленджик, 5–8 сентября 2022 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "ЕАГЕ ГЕОМОДЕЛЬ". – 2022. – С. 411-421.

Чугаев, А. В. Сейсморазведка на отраженных волнах при межскважинных исследованиях на Верхнекамском месторождении калийных солей / А. В. Чугаев, И. А. Санфиоров, М. В. Тарантин // Геология и геофизика. – 2023. – Т. 64, № 2. – С. 293-307.

Чугаев, А. В. Скважинный электроискровой источник возбуждения упругих колебаний для целей высокоразрешающей сейсморазведки / А. В. Чугаев, А. И. Бабкин // Горное эхо. – 2016. – № 3(64). – С. 18-21.

Чугаев, А. В. Сравнение оптоволоконной системы регистрации сейсмоакустических сигналов и гидрофонов при межскважинных исследованиях / А. В. Чугаев, А. И. Кузнецов // Горное эхо. – 2022. – № 3(88). – С. 42-49.

Чугаев, А.В. Анализ вторичного поля головных волн при межскважинных сейсмических исследованиях / А. В. Чугаев, И. А. Санфиоров, М. В. Тарантин, К. Ю. Томилов // Геофизика. – 2020. – № 5. – С. 4-12.

Чугаев, А.В. Изучение скоростной характеристики околоскважинного пространства с помощью головных волн, регистрируемых при межскважинном просвечивании / А. В. Чугаев, В. П. Лисин, А. И. Бабкин, К. Ю. Томилов // Инженерная и рудная геофизика 2020 : 16-я научно-практическая конференция совместно с семинаром «Инженерная и рудная геология 2020», Пермь, 14–18 сентября 2020 года. – Пермь: Общество с ограниченной ответственностью "ЕАГЕ ГЕОМОДЕЛЬ". – 2020. – С. 72.

Чугаев, А.В. Определение скоростных параметров разреза по сейсмическим скважинным исследованиям / А. В. Чугаев, В. П. Лисин, И. А. Санфиоров, В. В. Никифоров, В. П. Зеленин // Инженерная геофизика 2017 : Труды конференции: электронное издание, Кисловодск, 24–28 апреля 2017 года. – Кисловодск: ЕАГЕ. – 2017.

Чугаев, А.В. Особенности формирования волнового поля при изучении ледопородного ограждения шахтного ствола с помощью скважинных сейсмических методов / А. В. Чугаев, А. В. Пугин, В. П. Лисин, С. А. Тараканов // 15-я конференция и выставка «Инженерная и горная геофизика

2019», Геленджик, 22–26 апреля 2019 года. – Геленджик: EAGE, 2019. – С. 307–317.

Шевченко, А. А. Метод оценки точности скоростного анализа общей глубинной точки / А. А. Шевченко // Технологии сейсморазведки. – 2011. – № 4. – С. 12-18.

Шериф, Р. Сейсморазведка. Т.2. / Р. Шериф, Л. Гелдарт – М.: Мир. – 1987. – 193 с.

Шехтман, Г. А. Кратные волны в методе вертикального сейсмического профилирования: проклятие или подспорье? / Г. А. Шехтман // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2015. – Т. 54, № 4. – С. 64-68.

Шехтман, Г. А. Формирование изображений среды в методе ВСП / Г. А. Шехтман // Технологии сейсморазведки. – 2016. – № 3. – С. 5-21.

Шиман, М.И. Предотвращение затопления калийных рудников. М.: Недра, 1992. – 176 с.

Шишкина, М. А. К вопросу о разрешающей способности межскважинной лучевой сейсмической томографии / М. А. Шишкина, И. В. Фокин, С. А. Тихоцкий // Технологии сейсморазведки. – 2015. – № 1. – С. 5-21.

Шокин, Ю.П. Анализ причин затопления калийных рудников ГДР и ФРГ подземными водами и рассолами // Тр. ВНИИГ. – 1969. – Вып. 51. – С. 23–40.

Шулаков, Д.Ю. Возможность использования скважин малой глубины для повышения качества исходных сейсмограмм при микросейсмическом мониторинге гидроразрыва пласта / Д. Ю. Шулаков, И. А. Черных, А. В. Шумилов, Е. А. Овчинникова // Геофизика. – 2018. – № 5. – С. 81-84.

Ярославцев, А. Г. Инженерная сейсморазведка при строительстве и эксплуатации шахтных стволов на соляных месторождениях / А. Г. Ярославцев, Т. В. Байбакова // 15-я конференция и выставка «Инженерная и горная геофизика 2019», Геленджик, 22–26 апреля 2019 года. – Геленджик, 2019. – С. 131-140.

Ярославцев, А. Г. Отражение ледопородного ограждения стволов в сейсмическом волновом поле / А. Г. Ярославцев // Горное эхо. – 2019. – № 3(76). – С. 52-57.

Ярославцев, А. Г. Шахтные сейсмоакустические исследования при контроле предохранительных целиков в калийных рудниках / А. Г. Ярославцев, К. Б. Фаткин // Инженерная и рудная геофизика 2020 : 16-я научно-практическая конференция совместно с семинаром «Инженерная и рудная геология 2020», Пермь, 14–18 сентября 2020 года. – Пермь: Общество с ограниченной ответственностью "ЕАГЕ ГЕОМОДЕЛЬ", 2020. – С. 29.

Alekseev, A. E. A phase-sensitive optical time-domain reflectometer with dual-pulse phase modulated probe signal / A. E. Alekseev, V. S. Vdovenko, B. G. Gorshkov, V. T. Potapov, D. E. Simikin // Laser Physics. – 2014. – Vol. 24(11).

Alekseev, A. E. A phase-sensitive optical time-domain reflectometer with dual-pulse phase modulated probe signal / A. E. Alekseev, V. T. Potapov, V. S. Vdovenko [et al.] // Laser Physics. – 2014. – Vol. 24, No. 11. – P. 115106.

Antonelli, M. Integrated crosswell seismic: case histories in advanced technology to Improve reservoir description / M. Antonelli, F. Miranda, L. Terzi, G. Valenti // First Break. – 2004. – №22. – P. 49–56.

Arkhipov, A. Check and Monitoring of Condition of Concrete Slurry Wall, Jet-grouting and Frozen Soil Fences by Crosshole Sounding Method in Underground Construction / A. Arkhipov // 15th International scientific conference “Underground Urbanisation as a Prerequisite for Sustainable Development” 12-15 September 2016, St. Petersburg, Russia. – St.Petersbug: Elsevier Ltd, 2016. – P. 11-18.

Assous, S. Shearlets and sparse representation for microresistivity borehole image inpainting. / S. Assous, P. Elkington // Geophysics. – 2018. – №. 83. – P. D17-D25.

ASTM D4428 / D4428M – 14. Standard Test Methods for Crosshole Seismic Testing. <https://www.astm.org/Standards/D4428.htm>.

Ba, E.V.N. Potential of Surface-to-Tunnel Seismic Tomography to Detect Vertical Faults: Application to the Tournemire Underground Research Laboratory,

France. / E.V.N. Ba, M. Noble, C. Gélis [et al.] // Pure Appl. Geophys. – 2020. – 177. – P. 4143–59.

Bai, C. Simultaneous Inversion for Velocity and Reflector Geometry Using Multi-phase Fresnel Volume Rays / C. Bai, X. Li, G. Huang, S. Greenhalgh // Pure Appl. Geophys. – 2014. – № 171. – P. 1089–105.

Baird, A. Modelling the response of helically wound DAS cables to microseismic arrivals. / A. Baird // First EAGE Workshop on Fibre Optic Sensing. European Association of Geoscientists & Engineers. – 2020.

Baker, L. J. Cross-borehole seismic imaging / L.J. Baker, J.M. Harris // Presented at the 54th Ann. Internat. Mtg. – 1984. – SEG.

Bakulin, A. Smart DAS uphole acquisition system for near-surface characterization and imaging / A. Bakulin, P. Golikov, R. Smith, K. Erickson, I. Silvestrov, M. Al-Ali // SEG Technical Program Expanded Abstracts. – 2018. – P. 201-205.

Bakulin, A. Surface seismics with DAS: An emerging alternative to modern point-sensor acquisition / A. Bakulin, I. Silvestrov, R. Pevzner // The Leading Edge. – 2020. – №39. – P.808–818.

Barton D.C. The seismic method of mapping geological structure. // AIME Geophys. Prosp. – 1929. – 81. – P. 572-624

Bellefleur, G. Vertical seismic profiling using distributed acoustic sensing with scatter-enhanced fibre-optic cable at the Cu–Au New Afton porphyry deposit, British Columbia, Canada / G. Bellefleur, E. Schetselaar, D. Wade, D. White, R. Enkin, D.R. Schmitt // Geophysical Prospecting. – 2020. – №68. – P. 313-333.

Berron, C. Permanent, continuous & unmanned 4D seismic monitoring: Peace river case study / C. Berron, L. Michou, B. De Cacqueray, F. Duret, J. Cotton, E. Forgues // SEG Technical Program Expanded Abstracts. – 2015. – P. 5419-23.

Burns, D. R. Fracture properties from seismic scattering / D. R. Burns, M. E. Willis, M. N. Toksöz, L. Vetri // The Leading Edge. – 2007. – Vol. 26. – P. 1186–96.

Byun, J. Postmap migration of crosswell reflection seismic data / J. Byun, J.W. Rector, T. Nemeth // *Geophysics*. – 2002. – №67. – P. 135-146.

Bóna, A. Amplitude and Phase Response of DAS Receivers / A. Bóna, T. Dean, J. Correa, R. Pevzner, K.V. Tertyshnikov, L. Van Zaanen // *79th EAGE Conference and Exhibition*. – Paris, France. – 2017.

Cai, Z. Comparative Research between DAS-VSP and Conventional VSP Data / Z. Cai, G. Yu, Q. Zhang [et al.] // *SEG Global Meeting Abstracts 2016*. – P. 81-84.

Červený, V. Fresnel volume ray tracing / V. Červený, J.P. Soares // *Geophysic*. – 1992. – № 57. – P. 902-915.

Chen, S.T. Subsurface imaging using reversed vertical seismic profiling and crosshole tomographic methods. / S.T. Chen, L.J. Zimmerman, J.K. Tugnait // *Geophysics*. – 1990. – №55. – P. 1478-1487.

Chen, Y. Offshore subsurface characterization enabled by fiber-optic distributed acoustic sensing (DAS): An East China Sea 3D VSP survey example. / Y. Chen, J. Zong, C. Liu [et al.] // *Frontiers in Earth Science*. – 2023. – № 11.

Chopra, S. Seismic resolution and thin-bed reflectivity inversion. / S. Chopra, J. Castagna, O. Portniaguine // *CSEG Recorder*. – 2006. – 31(1). – P. 19–25.

Chugaev, A. The Integrated Borehole Seismic Surveys at the Verkhnekamskoye Potassium Salt Deposit / A. Chugaev, I. Sanfirov, M. Tarantin [et al.] // *Lecture Notes in Networks and Systems*. – 2022. – Vol. 342 LNNS. – P. 255-269.

Correa J. Analysis of signal to noise and directivity characteristics of DAS VSP at near and far offsets — A CO2CRC Otway Project data example / J. Correa, A. Egorov, K. Tertyshnikov, A. Bona, R. Pevzner, Tim Dean, Barry Freifeld, Steve Marshall // *The Leading Edge*. – 2017. – Vol. 36. – P. 994a1-994a7.

Cosma, C. Kimberlite Delineation by Seismic Side-scans from Boreholes: Exploration in the New Millennium / C. Cosma, A. Wolmarans, D. Eichenberg, N. Enescu // *Proceedings of the Fifth Decennial International Conference on Mineral exploration*. – 2007.

Daley, T.M. Field testing of fiber-optic distributed acoustic sensing (DAS) for subsurface seismic monitoring / T.M. Daley, B. M. Freifeld, J. Ajo-Franklin [et al.] // *The Leading Edge*. – 2013. – №32. – P. 699-706.

de Kool, M. A practical grid-based method for tracking multiple refraction and reflection phases in three-dimensional heterogeneous media / M. de Kool, N. Rawlinson, M. Sambridge // *Geophys. J. Int.* – 2006. – № 167. – P. 253–270.

Dean, T. The effect of gauge length on axially incident P-waves measured using fibre optic distributed vibration sensing: Gauge length effect on incident P-waves. / T. Dean, T. Cuny, A. H. Hartog // *Geophysical Prospecting*. – 2017. – 65(1). – P. 184–193.

Dean, T. Wavenumber response of data recorded using distributed fibre-optic systems. / T. Dean, B. Papp, A. Hartog // *3rd EAGE Workshop on Borehole Geophysics*. Netherlands: EAGE Publications BV. – 2015.

Dehghannejad, M. High-resolution reflection seismic imaging for the planning of a double-track tunnel in the city of varberg, southwest Sweden / M. Dehghannejad, A. Malehmir, M. Svensson [et al.] // *Near Surface Geophysics*. – 2017. – Vol. 15. – P. 226 – 240.

den Boer, J. J. Detecting broadside acoustic signals with a fiber optical distributed acoustic sensing (DAS) assembly. / A. Mateeva, J.G. Pearce, J. Mestayer [et al.] // US Patent [US 2014/0345388 A1](#), 27 Nov 14.

Denham, L. R. The limits of seismic resolution / L.R. Denham // *SEG Technical Program Expanded Abstracts*. – 2000. – P. 2401-2404.

Dix, C. Interpretation of well-shot data // *Geophysics*. – 1939. – Vol. 4. № 1. – P. 24-32.

Dix, C. Interpretation of well-shot data-II // *Geophysics*. – 1945. – Vol. 10. – P. 160-170.

Egorov, A. Realistic modeling of surface seismic and VSP using DAS with straight and shaped fibers of variable gauge length / A. Egorov, M. Charara, E. Alfataierge, A. Bakulin // *First International Meeting for Applied Geoscience &*

Energy Expanded Abstracts. Tulsa, OK, USA: Society of Exploration Geophysicists. – 2021. – P. 184–193.

Fang, X. Detection of formation S-wave in a slow formation using a monopole acoustic logging-while-drilling tool / X. Fang, A. Cheng // *Geophysics*. – 2018. – 83. – P. D9-D16.

Fessenden, R. Method and apparatus for locating ore bodies / R.A. Fessenden. // US patent US1240328A, 1917.

Findaly, M. J. The crosshole seismic reflection method in opencast coal exploration / M.J. Findaly, N.R. Goult, J.E. Kragh // *First Break*. – 2007. – Vol. 25. – No. 7. – P. 93–97.

Foti, S. Guidelines for the good practice of surface wave analysis: a product of the InterPACIFIC project / S. Foti, F. Hollender, F. Garofalo et al. // *Bull. Earthquake Eng.* – №16. – P. 2367–2420 (2018).

Gaiser, J. 3C Seismic and VSP: Converted waves and vector wavefield application. – SEG Books. – 2016. – 640 p.

Gibson, R. L. Jr. Radiation from seismic sources in cased and cemented boreholes / R. L. Jr. Gibson // *Geophysics*. – 1994. – B59. – P. 518–533.

Glubokovskikh, S. Multiwell Fiber Optic Sensing Reveals Effects of CO₂ Flow on Triggered Seismicity / S. Glubokovskikh, P. Shashkin, S. Shapiro, B. Gurevich, R. Pevzner // *Seismological Research Letters*. – 2023. – 94(5). – P. 2215–2230.

Gorshkov, B. G. A Cost-Effective Distributed Acoustic Sensor for Engineering Geology / B.G. Gorshkov, A.E. Alekseev, D.E. Simikin, M.A. Taranov, K.M. Zhukov, V.T. Potapov // *Sensors*. – 2022. – 22. – 9482.

Gorshkov, B. G. Low noise distributed acoustic sensor for seismology applications / B. G. Gorshkov, A. E. Alekseev, M. A. Taranov [et al.] // *Applied Optics*. – 2022. – Vol. 61, No. 28. – P. 8308.

Han, B. Wavelength-dependent Fresnel beam propagator and migration in VTI media / B. Han, H. Gu, S. Liu [et al.] // *J. of Appl. Geophys.* – 2018. – № 155. – P. 176–186.

Harris, J. M. High resolution cross-well imaging of a west Texas carbonate reservoir. Part 1. Data acquisition and project overview / J.M. Harris, R. Nolen-Hoeksema, J.W. Rector, M. Van Schaack, S.K. Lazaratos // SEG Technical Program Expanded Abstracts 1992. – January 1992. – P. 35–39.

Hartog, A. The optics of distributed vibration sensing. / A. Hartog, O. I. Kotov, L. B. Liokumovich // Second EAGE Workshop on Permanent Reservoir Monitoring 2013 – Current and Future Trends. Netherlands: EAGE Publications BV. – 2013.

Hartog, H. An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors. – CRC Press. – 2017. – 440 p.

Henriet, J. P. Borehole seismic profiling and tube wave applications in a dam site investigation. / J. P. Henriet, J. Schittekat, P. Heldens, // Geophysical Prospecting. – 1983. – No. 31. – P. 72-86.

Hubral, P. Determination of Fresnel zones from traveltimes measurements / P. Hubral, J. Schleicher, M. Tygel, C. Hanitzsch // Geophysics. – 1993. – № 58. – P. 703–712.

Ikeda, T. Surface wave attenuation in the shallow subsurface from multichannel-multishot seismic data: a new approach for detecting fractures and lithological discontinuities. / T. Ikeda, T. Tsuji // Earth, Planet and Space. – 2016. – 68(111). – P. 14.

Innanen, K. Determination of seismic-tensor strain from Helical Wound Cable-Distributed Acoustic Sensing cable with arbitrary and nested-helix winds. / K. Innanen // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2017. Society of Exploration Geophysicists. – 2017. – P. 926–930.

Jessie, M. A. Physical seismic modeling of a vertical fault / M. A. Jessie, D. C. Lawton, J. Wong // SEG Tech. Prog. Exp. Abstr. – 2012. – P. 1-6.

Jodeiri, A. F. High-resolution 2.5D multifocusing imaging of a crooked seismic profile in a crystalline rock environment: Results from the Larder Lake area, Ontario, Canada / Akbari Fam H. Jodeiri, M. Naghizadeh, R. Smith, O. Yilmaz [et al.] // Geophysical Prospecting. – 2022. – P. 1–29.

Justice, J. H. Solanki Acoustic tomography for monitoring enhanced oil recovery / J. H. Justice, A. A. Vassiliou, S. Singh [et al.] // *The Leading Edge*. – 1989. – 8(2). – P. 12-19.

Khalil, A.A. Full-waveform processing and interpretation of kilohertz cross-well seismic data / A.A. Khalil, R.R. Stewart, D.C. Henley // *Geophysics*. – 1993. – №58. – P. 1248–1256.

Koivisto, E. 2D reflection seismic investigations at the Kevitsa Ni-Cu-PGE deposit, northern Finland / E. Koivisto, A. Malehmir, P. Heikkinen, S. Heinonen, I. Kukkonen // *Geophysics*. – 2012. – Vol. 77. – P. 149–162.

Koulakov, I. Creating realistic models based on combined forward modeling and tomographic inversion of seismic profiling data / I. Koulakov, T. Stupina, H. Kopp // *Geophysics*. – 2010. – Vol. 75, No. 3. – P. B115-B136.

Koulakov, I. LOTOS Code for Local Earthquake Tomographic Inversion: Benchmarks for Testing Tomographic Algorithms / I. Koulakov // *Bulletin of the Seismological Society America*. – 2009. – V. 99. – № 1. – C. 194-214.

Kuvshinov, B.N. Interaction of helically wound fibre-optic cables with plane seismic waves. / B.N. Kuvshinov // *Geophysical Prospecting*. – 2016. – №64. – 671–688.

Lamb, H. On the velocity of sound in a tube, as affected by the elasticity of the walls. / H. Lamb // *Memoirs and Proceedings of the Manchester literary and Philosophical Society*. – 1898. – Vol. 42. Mem. 9. – P. 1-16.

Lazaratos, S.K. High resolution cross well imaging of a west texas carbonate reservoir / S.K. Lazaratos, J.M. Harris, J.W. Rector, M. Van Schaack // Part 4. Reflection imaging // *SEG Technical Program Expanded Abstracts 1992*. – January 1992. – P. 49–53.

Lebedev, M. Application of Cross-Hole Tomography for Assessment of Soil Stabilization by Grout Injection / M. Lebedev, K. Dorokhin // *Geosciences*. – 2019. – №9(399).

Lehmann, B. Exploration of tunnel alignment using geophysical methods to increase safety for planning and minimizing risk / B. Lehmann, D. Orłowski, R. Misiek // *J. Rock Mech. and Rock Eng.* – 2010. – Vol. 43. – P. 105–116.

Levin, L. Y. Improving methods of frozen wall state prediction for mine shafts under construction using distributed temperature measurements in test wells / L. Y. Levin, M. A. Semin, O. S. Parshakov // *Journal of Mining Institute.* – 2017. – Vol. 237. – P. 268 – 274.

Levin, L. Y. Mathematical prediction of frozen wall thickness in shaft sinking / L. Y. Levin, M. A. Semin, O. S. Parshakov // *Journal of Mining Science.* – 2017. – Vol. 53, No. 5. – P. 938–944.

Li, C. High-resolution Radon transforms for improved dipole acoustic imaging / C. Li, W. Yue // *Geophysical Prospecting.* – 2017. – Vol. 65, №. 2. – P. 467-484.

Li, G. Common reflection-point stacking of crosswell seismic data. / G. Li, R.R. Stewart // *Texas SEG Technical Program Expanded Abstracts 1994, Friendswood.* – January 1994. – P. 42-45.

Lisin, V. P. Investigation of erosion of concrete in dam using seismic tomography and surface waves / V. Lisin, I. Sanfirov, V. Spudulis, V. Ivanov, V. Grinek // *13th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Istanbul, Turkey.* – September, 2007.

Lisin, V. P. Investigation of the coastal soil suffosion by spatial near-surface seismic / V. Lisin, A. Scharansky, I. Cogan. // *66th EAGE Conference & Exhibition.* – Paris, France. – 7-10 June 2004.

Lisin, V. P. Seismoacoustic in geotechnical boreholes for estimation of adjoining soil properties // *Conference «BGS-2011».* – Budapest. – October 3-6, 2011.

Lisin, V. P. The study of the decompaction zones in soils by method of non-longitudinal high resolution VSP / V. Lisin, I. Sanfirov, A. Chugaev, A. Babkin, R. Seredenko // *77th EAGE Conference & Exhibition 2015.* – Madrid, Spain. – 1-4 June 2015.

Liu, Y. Sensitivity kernels for seismic Fresnel volume tomography / Y. Liu, L. Dong, Y. Wang, J. Zhu, Z. Ma // *Geophysics*. – 2009. – № 74. – P. U35-U46.

López-Comino, J.A. Induced seismicity response of hydraulic fracturing: results of a multidisciplinary monitoring at the Wysin site, Poland / J.A. López-Comino, S. Cesca, J. Jarosławski [et al.] // *Science Reports*. – 2018. – №8. – P. 8653.

Ma, Y. Characterizing hydraulic fracture growth using distributed acoustic sensing-recorded microseismic reflections / Y. Ma, D. W. Eaton, C. Wang, A. Aklilu // *Geophysics*. – 2023. – 88:6. – P.WC47-WC57.

Majer, E. L Fracture detection using crosswell and single well surveys / E. L. Majer, J. E. Peterson, T. Daley [et al.] // *Geophysics*. – 1997. – Vol. 62. – P. 495–504.

Marmalyevskyy, N. Migration of duplex waves / N. Marmalyevskyy, Y. Roganov, Z. Gorniyak, A. Kostyukevych, V. Mershchiiy // *SEG Technical Program Expanded Abstracts*. – 2005. – P. 2025-2028.

Mateeva, A. Advances in distributed acoustic sensing (DAS) for VSP / A. Mateeva, J. Mestayer, B. Cox [et al.] // *82nd Annual International Meeting*. – 2012. – SEG, Expanded Abstracts.

Matsushima, J. Cross-well CDP stacking and diffraction stacking with stacking velocity analysis in inhomogeneous media / J. Matsushima, S. Rokugawa, Y. Kato, T. Yokota, T. Miyazaki // *SEG Technical Program Expanded Abstracts 1997*. – January 1997. – P. 254–257.

Mayne, W. H. Common reflection point horizontal data stacking techniques / W. H. Mayne // *Geophysics*. – 1962. – V. 32. – P. 225-229.

McCollum, B. Utilization of Existing Wells in Seismograph Work / B. McCollum, W.W. LaRue // *AAPG Bulletin*. – 1931. – 15 (12). – P. 1409–1417.

McDonal, F. J. Attenuation of shear and compressional waves in Pierre shale / F. J. McDonal, F. A. Angona, R. L. Hills [et al.] // *Geophysics*. – 1958. – 23. – P. 421-439.

Menu, F. Ore-body delineation using borehole seismic techniques for hard rock exploration / F. Menu // PhD. thesis University of Curtin, Australia. – 2018. – 177 p.

Menu, F. Ore-body delineation using borehole seismic techniques for hard rock exploration / F. Menu, A. Greenwood, C. Dupuis // 23rd Geophysical Conference. – 2013. – ASEG, Extended Abstracts.

Nakajima, T. Case study on amplitude and phase response comparison between DAS and 3C geophone VSP surveys at a test site in Japan / T. Nakajima, T. Miyoshi, T. Hashimoto, Z. Xue // *Front. Earth Sci.* – 2022. – 10:991964.

Näsholm, S. P. Array signal processing on distributed acoustic sensing data: Directivity effects in slowness space / S. P. Näsholm, K. Iranpour, A. Wuestefeld [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth.* – 2022. – 127(2).

Nolet, G. A Breviary of seismic tomography. Cambridge Univ. Press. – 2008. – 344 p.

O'Brien, J. VSP imaging using free-surface multiples: A case study from the Gulf of Mexico / J. O'Brien, B. Farmani, B. Atkinson // *The Leading Edge.* – 2013. – №32. – P.1258–1266.

Oyem, A. Sorting and visualization of spectral-decomposition data / A. Oyem, J. Castagna // *The Leading Edge.* – 2015. – №. 34. – P. 42–44, 46–47.

Parker, T. Distributed Acoustic Sensing – a new tool for seismic applications / T. Parker, S. Shatalin, M. Farhadiroushan // *First Break.* – 2014. – Vol. 32(2). – P. 61–69.

Pica, A. Fast and accurate finite difference solution of the 3D eikonal equation parameterized in celerity / A. Pica // 67th Annual International Meeting, SEG, Exp. Abstr. – 1997. – P. 774–1777.

Podvin, P. Finite difference computation of traveltimes in very contrasted velocity model: A massively parallel approach and its associated tools / P. Podvin, I. Lecomte // *Geoph. J. Int.* – 1991. – V. 105. – № 1. – P. 271–284.

Protasov, M. I. True amplitude elastic Gaussian beam imaging of multicomponent walkaway vertical seismic profiling data / M. I. Protasov, V. A. Tcheverda // *Geophysical Prospecting*. – 2012. – Vol. 60, No. 6. – P. 1030-1042.

Prugger, F. F. Water problems in Saskatchewan mining – what can be learned from them? / F. F. Prugger, A. F. Prugger // *CIM bulletin*. – 1991. – Vol. 84, No. 945. – P. 58 – 66.

Ragozin, N.A. Experience of borehole seismic surveys by method of reversed vertical seismic profiling / N.A. Ragozin, I.G. Mindel, B.A. Trifonov // *Extended abstract. Near Surface 2011 - the 17th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. – 12 - 14 September 2011. – Leicester, United Kingdom.

Raji, W. Wavefield Analysis of Crosswell Seismic Data / W. Raji, Y. Gao, J. Harris // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2017. – №10, 217. – p. 1-9.

Rao, Y. Crosshole seismic tomography with cross-firing geometry / Y. Rao, Y. Wang, S. Chen, J. Wang // *Geophysics*. – 2016. – V.81. – P. R139-R146.

Rawlinson, N. Wavefront evolution in strongly heterogeneous layered media using the fast marching method / N. Rawlinson, M. Sambridge // *Geophys. J. Int.* – 2004. – № 156. – P. 631–647.

Rector, J.W. High resolution cross-well imaging of a west texas carbonate reservoir: Part 3. Wavefield separation / J.W. Rector, S.K. Lazaratos, J.M. Harris, M. Van Schaack // *SEG Technical Program Expanded Abstracts 1992*. – January 1992. – P. 45–48.

Ricker, N. The form and laws of propagation of seismic wavelets. // *Geophysics*. – 1953. – V.18. – P. 10-40.

Riedel, M. Underground vertical seismic profiling with conventional and fiber-optic systems for exploration in the Kylylahti polymetallic mine, eastern Finland / M. Riedel, C. Cosma, N. Enescu, E. Koivisto, K. Komminaho, K. Vaittinen, M. Malinowski // *Minerals*. – 2018. – 8(11):538.

Rietsch, E. Estimation of the signal-to-noise ratio of seismic data with an application to stacking / E. Rietsch // *Geophysical Prospecting*. – 2006. – №28. – P. 531-550.

Schreilechner, M. G. High Resolution Seismic Reflection in Geotechnical and Hydrogeological Applications / M. G. Schreilechner, C. G. Eichkitz // SEG Global Meeting Abstracts. – 2015. – P. 6–9.

Schuster, G. T. Resolution limits for crosswell migration and travelttime tomography // Geophysical Journal International. – 1996. – 127(2). – P. 427–440.

Schuster, G.T. Resolution limits of migration and linearized waveform inversion images in a lossy medium / G.T. Schuster, G. Dutta, J. Li // Geoph. J. Int. – 2017. – V. 209, № 3. – P. 1612–1621.

Schuster, G.T. Wavepath eikonal travelttime inversion: Theory / G.T. Schuster, A. Quintus-Bosz // Geophysics. – 1993. – № 58. – P. 1314-1323.

Shatalin, S. V. Interferometric optical time-domain reflectometry for distributed optical-fiber sensing. / S. V. Shatalin, V. N. Treschikov, A. J. Rogers // Applied Optics. – 1998. – 37(24). – P. 5600–5604.

Shekhtman, G.A. Areal modification of the VSP method. / G.A. Shekhtman, A.E. Zernov, O.A. Potapov et al.// 55th Ann. Mtg. of EAGE. – Stavanger. – 1993.

Sheriff, R.E. Nomogram for Fresnel-zone calculation // Geophysics. – 1980. – № 45. – P. 968-972.

Shi, W. Application of dipole array acoustic logging in the evaluation of shale gas reservoirs / W. Shi, X. Wang, Y. Shi [et al.] // Energies. – 2019. – № 12(20). – P. 1-17.

Smalley, N. CDP stacking and imaging of cross-well reflectors / N. Smalley, J.M. Harris // SEG Technical Program Expanded Abstracts 1992. – January 1992. – P. 87–90.

Spetzler, J. Application of a linear finite-frequency theory to time-lapse crosswell tomography in ultrasonic and numerical experiments / J. Spetzler, D. Šijačić, K. Wolf // Geophysics. – 2007. – № 72. – P. O19-O27.

Spetzler, J. The effect of small-scale heterogeneity on the arrival time of waves / J. Spetzler, R. Snieder // Geoph. J. Int. – 2001. – № 145. – P. 786–796.

Spetzler, J. The Fresnel volume and transmitted waves / J. Spetzler, R. Snieder // Geophysics. – 2004. – №69. – P. 653-663.

Steeple, D. Seismic reflection methods applied to engineering, environmental, and ground-water problems / D. Steeples, R. Miller // Symp. on the Application of Geoph. to Eng. and Environmental Problems Proc. – 1990. – P. 409–461.

Stork, A. L. Application of machine learning to microseismic event detection in distributed acoustic sensing data / A.L. Stork, A.F. Baird, S.A. Horne [et al.] // Geophysics. – 2020. – 85(5). – P. KS149–60.

Stork, A. L. Fibre-optic monitoring for high-temperature Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS) projects at geothermal energy sites / A.L. Stork, A. Chalari, S. Durucan, A. Korre, S. Nikolov // First Break. – 2020. – 38(10). – P. 61–67.

Tertyshnikov, K. Seasonal effects on DAS using buried helically wound cables / K. Tertyshnikov, G. Bergery, B. Freifeld, R. Pevzner // EAGE Workshop on Fiber Optic Sensing for Energy Applications in Asia Pacific. European Association of Geoscientists & Engineers. – 2020.

Van Schaack, M. High resolution cross-well imaging of a west texas carbonate reservoir: Part 2. Wavefield analysis and tomography / M. Van Schaack, J.M. Harris, J.W. Rector, S.K. Lazaratos // SEG Technical Program Expanded Abstracts 1992. – January 1992. – P. 40–44.

Vantassel, J. P. Extracting high-resolution, multi-mode surface wave dispersion data from distributed acoustic sensing measurements using the multichannel analysis of surface waves / J.P. Vantassel, B.R. Cox, P.G. Hubbard, M. Yust // J. Appl. Geophys. – 2022. – 205. – 104776.

Vasco, D.W. A trajectory mechanics approach for the study of wave propagation in an anisotropic elastic medium / D. W. Vasco, K. T. Nihei // Geoph. J. Int. – 2019. – V. 219, № 3. – P. 1885–1899.

Vasco, D.W. Beyond ray tomography: wave paths and Fresnel volumes / D. W. Vasco, J. E. Peterson, E. L. Majer // Geophysics. – 1995. – № 60. – P. 1790–804.

Verdon, J. P. Microseismic monitoring using a fibre-optic distributed acoustic sensor (DAS) array / J. P. Verdon, S. A. Horne, A. Clarke, A. L. Stork, A. F. Baird, J. M. Kendall // *Geophysics*. – 2020. – 85, no. 3. – P. KS89–KS99.

Vidale, J.E. Finite-difference calculation of traveltimes in three dimensions // *Geophysics*. – 1990. – № 55. – P. 521–526.

Vidale, J.E. Finite-difference traveltime calculation // *Bull. Seis. Soc. Am.* – 1988. – № 78. – P. 2062-2076.

Watanabe, T. Seismic traveltime tomography using Fresnel volume approach / T. Watanabe, T. Matsuoka, Y. Ashida // 69th Annual International Meeting, SEG Exp. Abstr. – 1999. – P. 1402–1405.

Wehner, D. Tube-wave monitoring as a method to detect shear modulus changes around boreholes: A case study / D. Wehner, F. Borges, M. Landrø // *Geophysics*. – 2021. – №86. – B193-B207.

White, R. S. Compressional to shear wave conversion in oceanic crust / R. S. White, R. A. Stephen // *Geophysical Journal International*. – V. 63, № 2. – 1980. – P. 547–565.

Widess, M.B. How thin is a thin bed / M.B. Widess // *Geophysics*. – 1973. – 38. – P. 1176-1180.

Willis, M.E. Effect of the angular response of a Fiber-Optic cable on DAS VSP recordings in Lateral wells / M.E. Willis, X. Wu, A. Padhi, A. Ellmauthaler, M. LeBlanc // 80th Annual International Conference and Exhibition. – 2018. – EAGE, Extended Abstracts.

Willis, M.E. Quantitative quality of distributed acoustic sensing vertical seismic profile data / M.E. Willis, D. Barfoot, A. Ellmauthaler, X. Wu, O. Barrios, C. Erdemir et al. // *Lead Edge*. – 2016. – 35(7). – 605–609.

Wong, J. Crosswell seismic imaging of a tight-gas reservoir / Wong J., Stewart R.R. // *SEG Technical Program Expanded Abstracts*. – 2007. – P. 442–446.

Wood, G. An interpretation of surface and borehole seismic surveys for mine planning at the Millennium uranium deposit, northern Saskatchewan, Canada / G.

Wood, C. O'Dowd, C. Cosma, N. Enescu // *Geophysics*. – 2012. – №77. – P. 203–212.

Wu, X. Compressional- and shear-wave studies of distributed acoustic sensing acquired vertical seismic profile data / X. Wu, M.E. Willis, W. Palacios et al. // *Lead Edge*. – 2017. – 36(12). – P. 987–93. <http://dx.doi.org/10.1190/tle36120987.1>

Wuestefeld, A. How to twist and turn a fiber: performance modeling for optimal DAS acquisitions / A. Wuestefeld, M. Wilks // *The Leading Edge*. – 2019. – 38(3). – P. 226–231

Xu, S. Enhanced tomography resolution by a fat ray technique / S. Xu, Y. Zhang, T. Huang // 76th Annual Int. Meeting, SEG Exp. Abstr. – 2006. – P. 3354–3357.

Yu, G. High-resolution crosswell seismic imaging in JiangSu Oilfield, China / G. Yu, B. Bryans, C. Ju, B. Liang, F. Zhou // 73rd Annual International Meeting, SEG Expanded Abstracts. – 2003. – P. 2251–2254.

Yu, J. Joint migration of primary and multiple reflections in RVSP data / Jianhua Yu and Gerard T. Schuster // SEG Technical Program Expanded Abstracts. – 2002. – P. 2373–2376.

Zaanen, L.V. A comparison of borehole seismic receivers / L.V. Zaanen, A. Bona, J. Correa, K. Tertyshnikov, T. Dean, R. Pevzner // SEG Technical Program Expanded Abstracts. – 2017. – P. 5974–8. <https://doi.org/10.1190/segam2017-17799478.1>

Zhang, L. Eikonal solver in the celerity domain / L. Zhang, J.W. Rector, G.M. Hoversten // *Geoph. J. Int.* – 2005. – V. 162, № 1. – P. 1–8.