

На правах рукописи



Чугаев Александр Валентинович

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

Специальность 2.8.3

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

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

Пермь 2024

Диссертация подготовлена в «Горном институте Уральского отделения Российской академии наук» («ГИ УрО РАН») – филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук (ПФИЦ УрО РАН).

Научный консультант: **Санфиров Игорь Александрович**
профессор, доктор технических наук,
директор «ГИ УрО РАН» (г. Пермь)

Официальные оппоненты:

Владов Михаил Львович, профессор, доктор физико-математических наук, заведующей кафедрой сейсмологии и геоакустики Геологического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (г. Москва),

Чеверда Владимир Альбертович, профессор, доктор физико-математических наук, руководитель лаборатории многоволновых сейсмических исследований Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (г. Новосибирск),

Шумилов Александр Владимирович, доцент, доктор технических наук, директор по промысловой геофизике публичного акционерного общества "Пермнефтегеофизика" (г. Пермь)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича Уральского отделения Российской академии наук (г. Екатеринбург)

Защита диссертации состоится «06» декабря 2024 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.201.02 при ПФИЦ УрО РАН по адресу: г. Пермь, ул. Сибирская 78-А. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке «ГИ УрО РАН» и на сайте «ПФИЦ УрО РАН»: <http://www.permsc.ru>.

Автореферат разослан «__» _____ 2024 года.

Отзывы, заверенные печатью организации, просим направлять в двух экземплярах не позднее, чем за 15 дней до защиты диссертации. В отзыве должны быть указаны фамилия, имя, отчество, должность, организация, почтовый адрес, телефон и электронная почта лица, предоставившего его.

Отзывы необходимо направлять по адресу: 614007, г. Пермь, ул. Сибирская 78 а. Телефон/факс: +7 (342) 216-75-02. Электронная почта: lserg@mi-perm.ru

Ученый секретарь
диссертационного совета, канд. техн. наук



С. Ю. Лобанов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Скважинные сейсмические исследования представляют собой особый раздел сейсморазведки, позволяющий регистрировать и возбуждать волновое поле 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 сейсморазведочных исследований залежей углеводородов.

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

Современное состояние аппаратурного 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 водопрводящие 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 ведение 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 головных преломленных 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 сеймики 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 отражённых 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 по методике общей глубинной точки (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.
6. 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; 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 разномасштабного 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., Фатькину 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 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; семье и родителям за поддержку и терпение.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Современное состояние скважинных сейсмических исследований и направления развития

Современные малоглубинные скважинные сейсмические исследования связаны преимущественно с инженерными изысканиями для оценки устойчивости зданий и сооружений. 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., Рослов Ю.В., Каминский А.Е. и др. Малоглубинные исследования направлены на получение скоростных распределений и акустических свойств в массиве и

проводятся, как правило, с применением прямых продольных волн, реже прямых поперечных волн.

Анализ реальных и синтетических волновых полей для сейсмо-геологических условий Верхнекамского месторождения солей показывает, что развитие скважинных исследований возможно за счет изучения дополнительных классов волн. 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.

Большая часть исследований описанных в работе выполнена аппаратным комплексом, основными элементами которого являются электроискровой источник возбуждения колебаний с энергией 600-2500 Дж и наборы 24-х канальных гидрофонных пьезокерамических датчиков с шагом 1, 2 и 4 м, а при наземной регистрации сейсмоприемники GS-20DX и GS-One. При наземном возбуждении упругих колебаний применяются классические наземные ударные или импульсные пороховые источники возбуждения колебаний. Цифровая регистрация осуществляется модульной сеймостанцией IS128.02, производство Россия-Латвия. Описываемые сейсмические материалы в большинстве случаев получены в гидронаблюдательных и геофизических скважинах, обсаженных пластиковой колонной (ПВХ) и заполненных водой или рассолом.

Оценка разрешающей способности преломленных и отраженных волн при межскважинных исследованиях на основании моделирования объема Френеля

Горизонтальная разрешающая способность наземных сейсмических исследований 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, в связи с чем предлагается использовать более общий способ – расчет объема первой зоны Френеля¹.

Для оценки разрешающей способности предложенных во 2-й главе технологий скважинных исследований выполнены расчеты объема Френеля головных и отраженных волн в сейсмогеологических условиях Верхнекамского месторождения калийных солей для типовых систем наблюдений.

Для получения объема первой зоны Френеля решается задача определения поля времен первых вступлений прямых и преломленных волн вблизи кровли

¹ Bai C., Li, X., Huang G., Greenhalgh S. Simultaneous Inversion for Velocity and Reflector Geometry Using Multi-phase Fresnel Volume Rays // Pure Appl. Geophys. 2014. № 171. P. 1089–1105.

солей для взаимных точек. При расчетах в модели заданы типичные значения скоростей для Верхнекамского месторождения: в верхней соляно-мергельной толще (СМТ) $V_1 = 2200$ м/с, в нижней толще, представленной покровной каменной солью (ПКС), $V_2 = 4500$ м/с. В результате строится поле времен, на котором линии изохрон соответствуют объему Френеля при определенной доминантной частоте акустического сигнала (рис. 1).

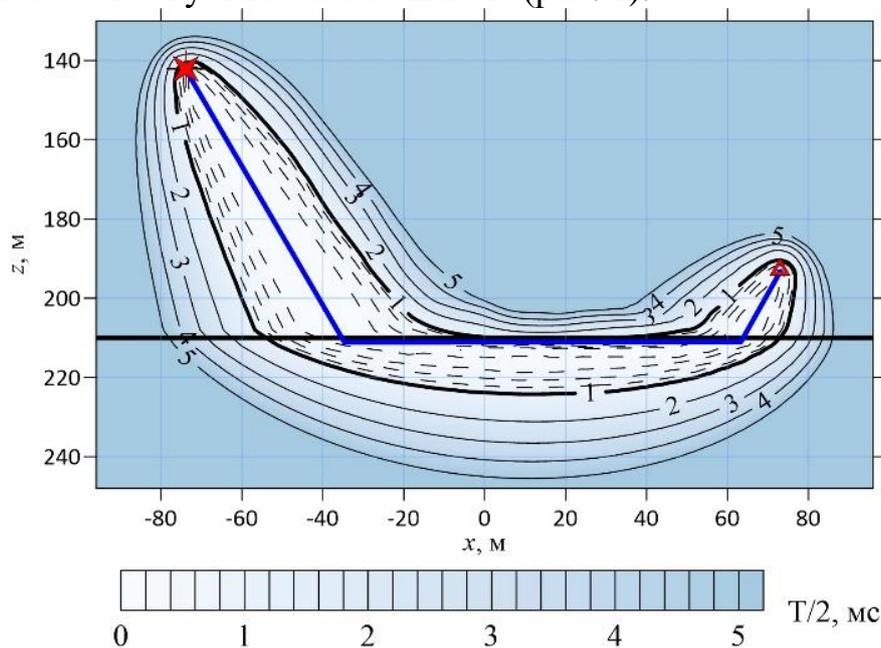


Рисунок 1. Поле времен для определения объема первой зоны Френеля головной волны. Синий луч - положение идеального луча. $T/2 = 1$ мс соответствует частоте сигнала 500 Гц.

Глава 2. Методические решения при проведении скважинных сейсмических исследований

По результатам анализа современного состояния скважинных сейсмоакустических исследований определены направления развития, главным образом основанные на изучении отраженных и преломленных волн, регистрируемых при проведении межскважинного просвечивания и вертикального сейсмопрофилирования.

Получение глубинного сейсмического разреза при межскважинном сейсмическом просвечивании.

Разработан способ получения глубинного сейсмического разреза по результатам обработки отраженных волн, регистрируемых при проведении межскважинного сейсмического просвечивания. Для условий Верхнекамского месторождения солей, с контрастным изменением скоростей на кровле соляной толщи, головные и отраженные волны из нижнего полупространства могут регистрироваться раньше первых вступлений прямой проходящей волны. Способ включает предварительное получение скоростного распределения на основании межскважинной многолучевой томографии, выделение отраженных волн из верхнего и нижнего полупространства, миграцию и суммирование. Миграция выполняется путем решения прямой задачи на основе лучевой сейсмологии с учетом скоростной модели среды и нарушения монотонности функции времени регистрации отражений от различных горизонтов.

Координаты точек 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:

$$t = \sum_j \frac{C_j}{V(X_j, H_j)}. \quad (1)$$

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) .

Обобщенная схема получения глубинного сейсмического разреза с помощью отраженных волн при межскважинном просвечивании представлена на рисунке 2. Основными этапами являются:

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

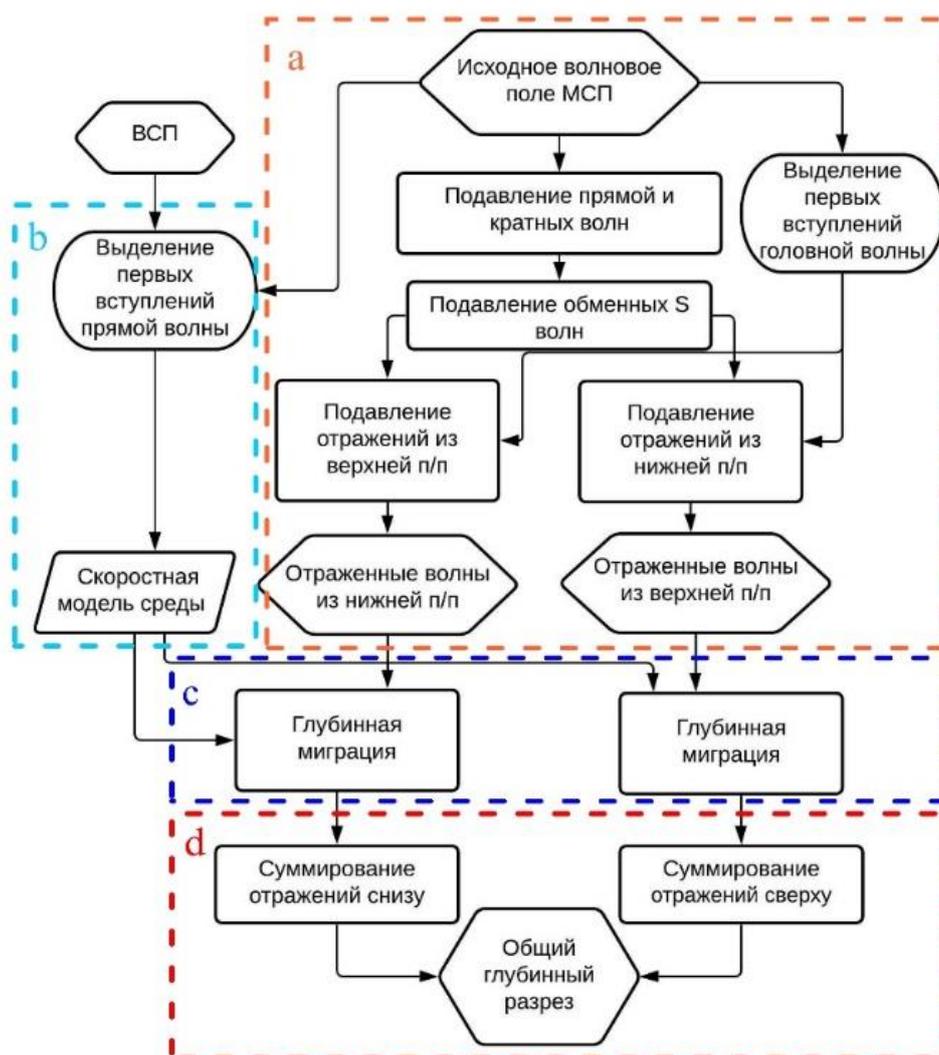


Рисунок 2. Общая схема получения глубинного сейсмического разреза с помощью отраженных волн при межскважинном просвечивании.

На рисунке 3 приведено сравнение глубинных разрезов, полученных по данным межскважинного просвечивания и наземных исследований на том же участке. Отмечается 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.

Горизонтальная разрешающая способность оценивалась по результатам моделирования объема Френеля и составляет в данном случае 10-15 м, что существенно меньше, чем при наземных исследованиях, для которых половина диаметра зоны Френеля на изучаемых глубинах оценивается как 40-50 м.

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

- появление зон 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.

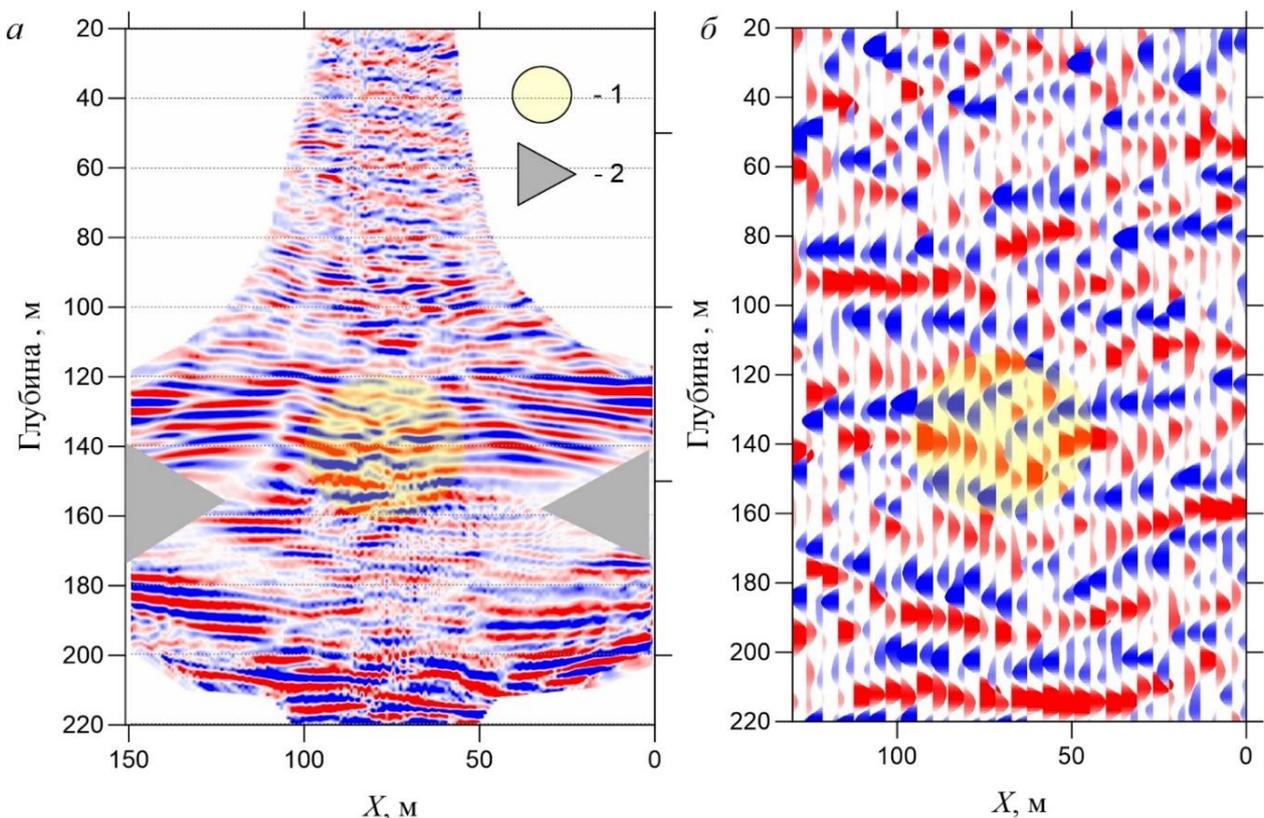


Рисунок 3. Сравнение глубинных сейсмических разрезов по данным межскважинного просвечивания (а) и по наземным данным на том же участке (б). 1 – аномалия волнового поля, 2 – зона тени.

Головные преломленные волны при изучении околоскважинного пространства

Разработана теория изучения массива с помощью преломленных головных волн, регистрируемых при проведении скважинных исследований, связывающая кажущиеся скорости головных волн $V_k(h)$ со скоростями упругих волн в околоскважинном пространстве $V_1(h)$ и в высокоскоростном преломляющем слое V_2 (рис. 4):

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

где h – глубина, φ – угол падения преломляющей границы. В данное выражение не входит i – критический угол выхода преломленной волны, зависящий от соотношения V_1 и V_2 .

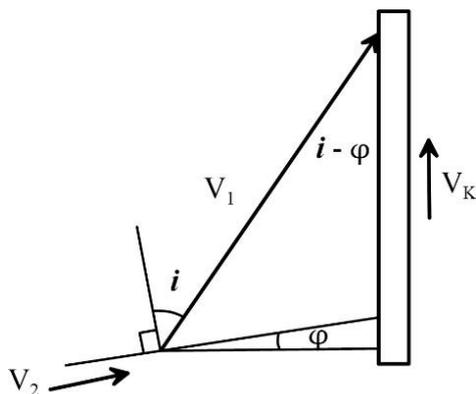


Рисунок 4. Схема регистрации головной волны при наклонном залегании преломляющей границы

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.

Полученное соотношение является основой для определения структурно-физических характеристик массива. Амплитудный спектр головных волн при МСП намного шире, чем при наблюдениях ВСП, в частности в сейсмогеологических условиях Верхнекамского месторождения при расстояниях между скважинами 150-250 м максимум спектра первых вступлений головной волны составляет 270-300 Гц. 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 с помощью прямых волн в методе ВСП.

Суммирование головных волн

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

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 (ОПП) – в такой сортировке она определяется по годографу первых вступлений для нижнего приемника. Схема введения поправки приведена на рис. 5.
3. Выбор базы суммирования, определяется итеративно путем выполнения этапов 3 – 5 для получения максимального отношения сигнал/шум итогового волнового поля.
4. Суммирование 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 (рис. 6). Оценивается отношение сигнал/шум и частотный состав результирующей суммы.

Суммирование головных волн позволяет повысить точность определения времен первых вступлений, применяемых для получения скоростной характеристики породного массива. 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.

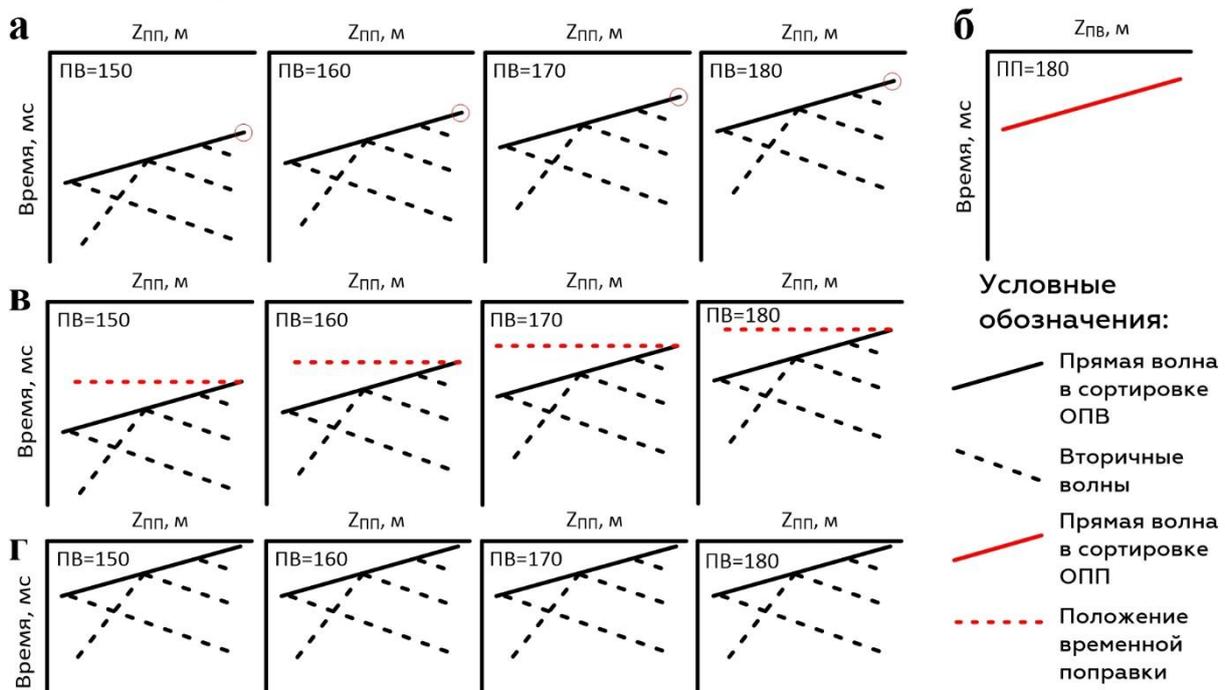


Рисунок 5. Схема введения поправки за положение источника возбуждений: а – первоначальное положение годографов в сортировке ОПВ; б – годограф в сортировке ОПП; в – положение статических поправок в сортировке общего пункта возбуждения (ОПП); г – результат введения поправки.

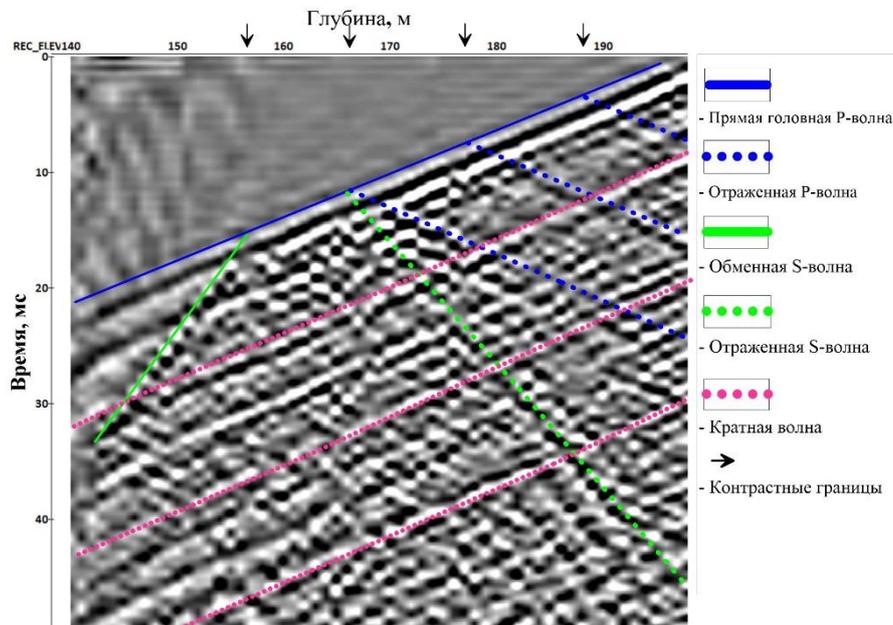


Рисунок 6. Результирующая суммарная сейсмограмма ОПВ (суперсейсмограмма)

Получение глубинного сейсмического разреза с помощью преломленно-отраженных волн

Лучевая схема формирования преломленно-отраженных волн представлена на рисунке 7. Специальный граф обработки суммарной сейсмограммы преломленной волны позволяет выделить поле преломленно-отраженных волн. Предложен способ миграции таких волн для получения глубинного разреза акустической контрастности. Принцип взаимности позволяет строить разрезы как для приемной, так и для излучающей скважины.

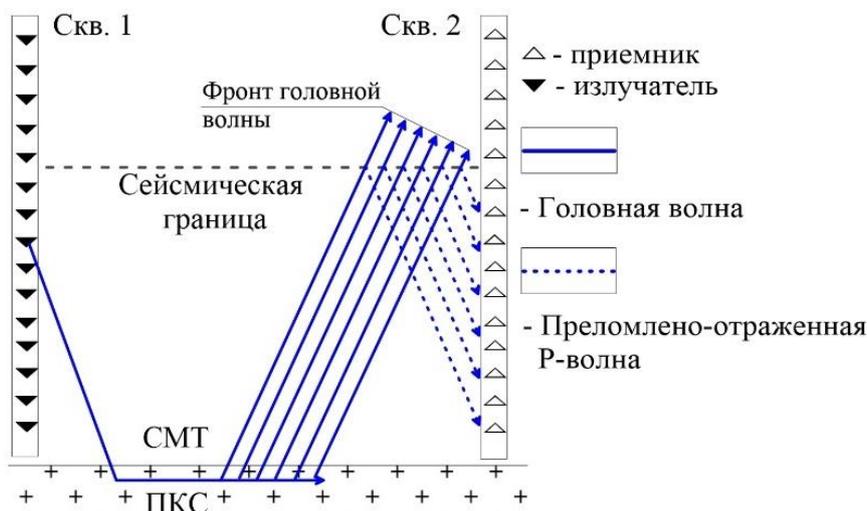


Рисунок 7. Лучевая схема хода лучей головных волн и вторичного волнового поля в межскважинном пространстве.

На первом этапе с помощью пространственно-временной фильтрации выделяется поле отраженных волн. 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, 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 близи скважины, преломленно-отраженные волны отображают пространственное распределение акустических свойств среды в области существования головной волны вблизи скважины.

Получение глубинного сейсмического разреза из поля преломленно-отраженных волн выполняется путем линейной миграции – с помощью привязки поля отраженных волн к координатной сетке межскважинного пространства (рис. 8):

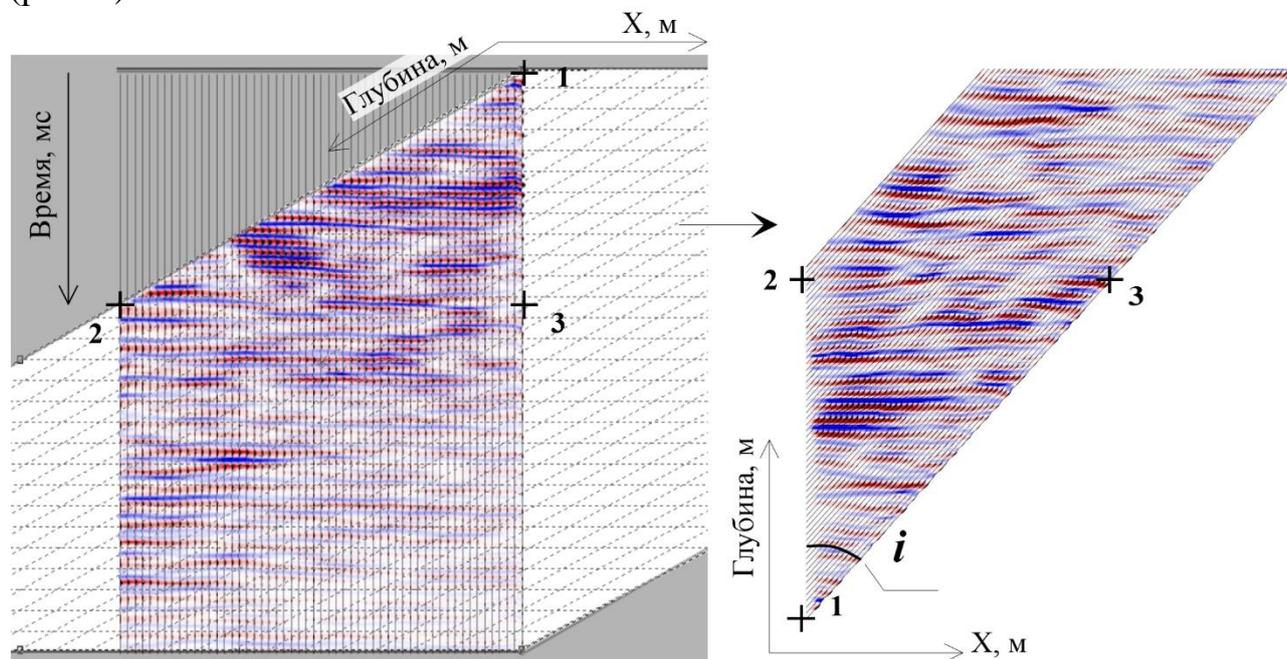


Рисунок 8. Трансформация волнового поля отраженной головной волны из координат $t-z$ в $x-z$

- 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 $\text{tg } i = V_k(h) / V_2$;
- 3) точки 2 и 3 лежат на одной глубине, расстояние между ними равно $X_{23} = H_{12} \text{tg } i$.

Полученные изображения позволяют расчленять толщу вмещающих пород, прослеживать акустические границы в окрестностях участвующих в просвечивании скважин и дополняют глубинные разрезы по данным отраженных волн при МСП, перекрывая зону тени.

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

Суммирование головных волн аналогичным образом можно выполнять в методе обращенного ВСП. Суммирование позволяет накапливать головные волны от всех пунктов возбуждения в излучающей скважине. В результате строится суперсейсмограмма, с помощью которой возможно обнаружение и локализация в пространстве субвертикальных зон с контрастными сейсмоакустическими свойствами.

Для суммирования трасс в пределах одной сейсмограммы общего пункта приема на поверхности вводится временная поправка за положение пункта возбуждения. Суммарная трасса характеризуется высоким отношением сигнал/шум. Данная операция выполняется для всех сейсмограмм ОПП, в результате чего строится сейсмограмма общего пункта возбуждения (ОПВ) по всему профилю приема (рис. 9).

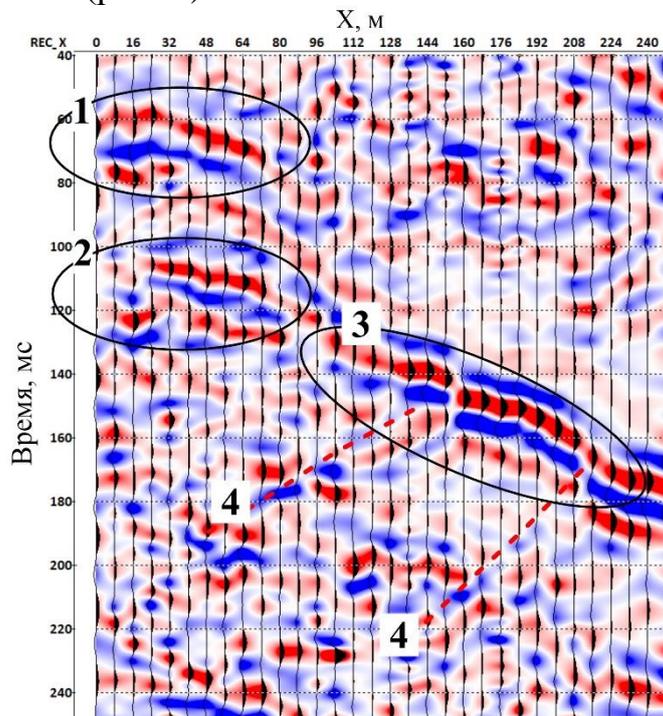


Рисунок 9. Суперсейсмограмма ОПВ в результате суммирования головных волн, зарегистрированных при ВСП. 1 – прямая волна, 2 – отражение от кровли солей, 3 – преломленная (головная) волна, 4,5 – преломленно-отраженная волна.

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 волной (рис. 10). Так, в описываемом примере, от точек на поверхности, характеризующихся понижением кажущейся скорости, берут начало годографы преломленно-отраженной волны (см. волны 4,5 на рисунке 9).

Угол наклона α данной субвертикальной границы можно определить из соотношения кажущихся скоростей падающей (V_k) и отраженной (V'_k) волны:

$$\alpha = \frac{1}{2} \left(\arcsin \left(\frac{V_k}{V'_k} \sin i_k \right) - i_k \right). \quad (3)$$

Глубину распространения вертикальной отражающей границы можно определить, ориентируясь на горизонтальную длину ее годографа dX :

$$H = dX \operatorname{ctg} (i_k + 2\alpha), \quad (4)$$

или для пластовой модели

$$H = dX \sum_j \operatorname{ctg} \left(\arcsin \left(\frac{V_j}{V_2} \right) + \varphi + 2\alpha \right). \quad (5)$$

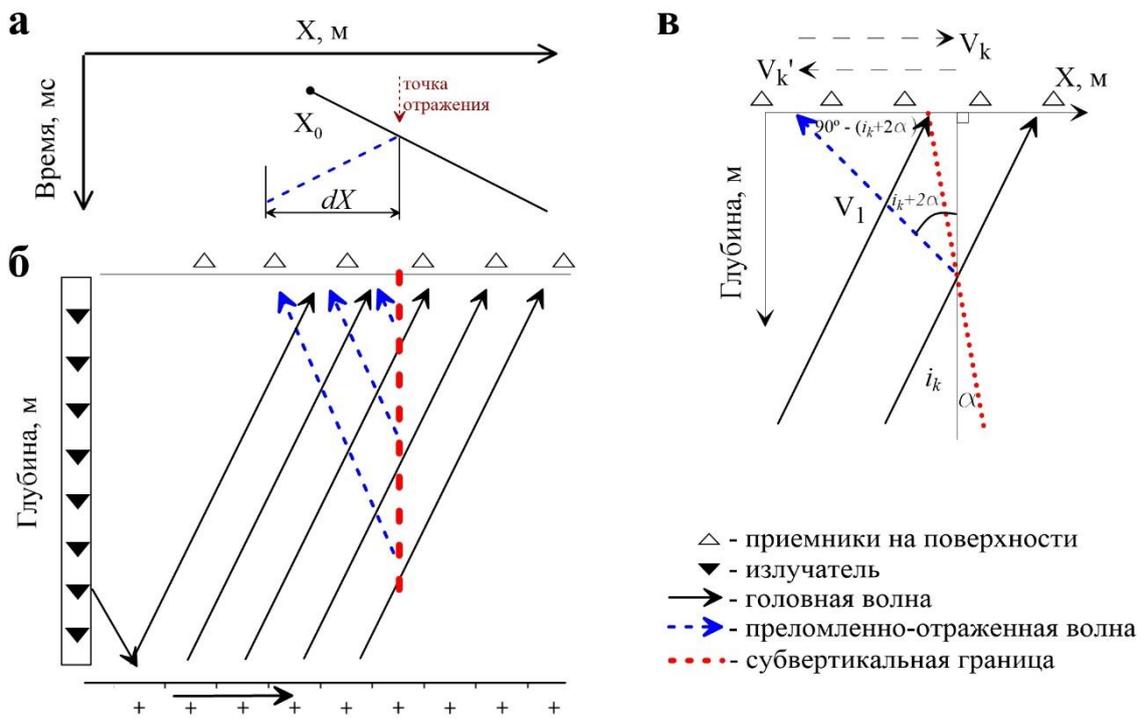


Рисунок 10. Регистрация головной и преломленно-отраженной волны на поверхности в системе наблюдений ВСП. Годограф (а), лучевая схема (б) и схема вблизи приемной линии (в).

Скважинное профилирование ОГТ

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 сплошности и толщины ледопородного ограждения (ЛПО) на всех этапах замораживания.

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. Наличие высококонтрастной акустической границы, образующейся при фазовом переходе в процессе заморозки грунта, однозначно определяет направление прихода отраженных волн (рис. 11).

В большинстве геологических условий при реализации методики ОГТ вдоль контрольной скважины будут зафиксированы контрастные отражения, ассоциируемые с вертикальными границами ЛПО. 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.

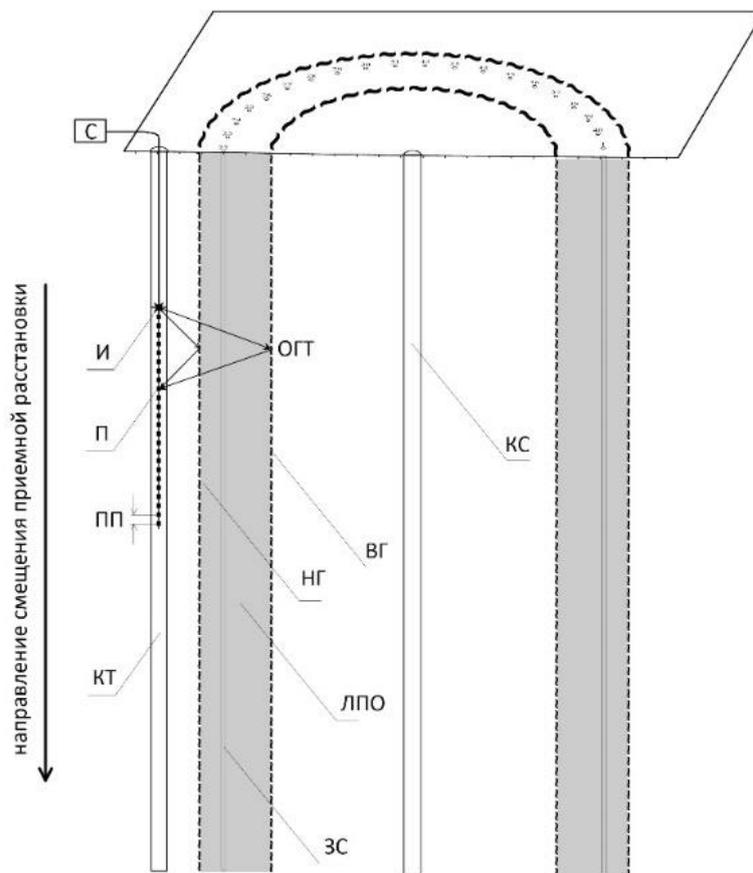


Рисунок 11. Схема наблюдений скважинной методики ОГТ. ЛПО - ледопородное ограждение, КТ - контрольно-термометрическая скважина, КС - контрольно-стволовая скважина, ЗС - замораживающие скважины, НГ - наружная граница ЛПО, ВГ - внутренняя граница ЛПО, С - сейсмостанция, И - источник колебаний (спаркер), П - пьезоэлектрические сейсмоприемники, ПП - шаг пунктов приема и возбуждения.

Сейсмический каротаж при выполнении скважинного профилирования ОГТ

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

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. При использовании 24-х канальной гидрофонной косы, за два прохода на каждом интервале скорость определяется 48 раз (рис. 12). На ближних удалениях интерференция волновой картины сильнее всего осложняет выделение первых вступлений, поэтому часть каналов с ближними удалениями не используется.

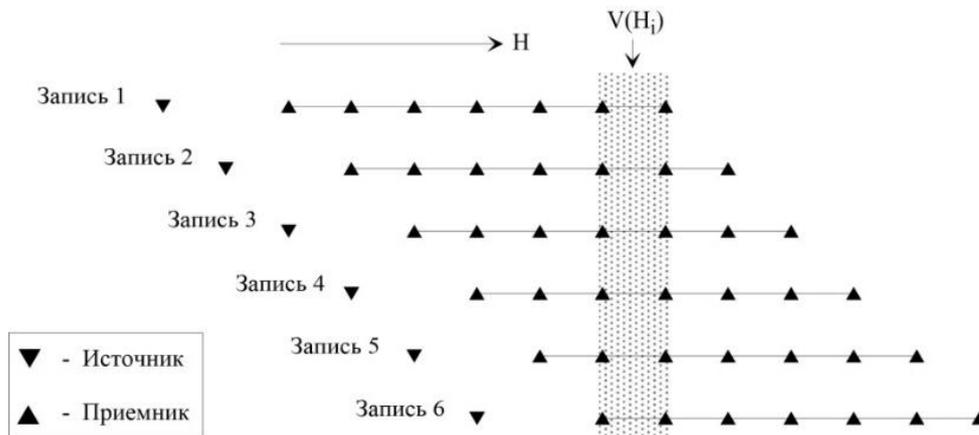


Рисунок 12. Многократное определение скорости при многоканальной системе наблюдений

Оценка разрешающей способности преломленных и отраженных волн при проведении скважинных исследований

Для оценки разрешающей способности рассмотренных методик выполнено моделирование объема Френеля для различных вариантов размещения пары источник-приемник в типичных сейсмогеологических условиях ВКМС (рис. 13).

В первом примере (рис. 13а) рассмотрен способ получения разрезов с помощью преломленно-отраженных волн при проведении МСП. Схожий принцип суммирования головных волн в методе ВСП использован при поиске субвертикальных акустических границ (рис. 13б). На рисунках 13в, г приведены лучевые схемы и соответствующие построения объема Френеля для отраженных волн при формировании отражений в солевой и надсолевой толщах.

В таблицу 1 сведены параметры сигнала и значения разрешающей способности, а также размеры получаемых сейсмических изображений по оси y .

Таблица 1 - Параметры сейсмических изображений, определенные способом объема первой зоны Френеля для различных скважинных сейсмических методик

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 (рис. 12а)	500	4	6-12	10-25
Поиск субвертикальных трещиноватых зон с помощью головных волн в методе ВСП (рис. 12б)	80	20	30-50	25-40
Отраженные волны в методе межскважинного просвечивания, галогенная толща (рис. 12в)	500	9	30-40	30-40
Отраженные волны в методе межскважинного просвечивания, надсолевая часть (рис. 12г)	400	5	7-15	15-40

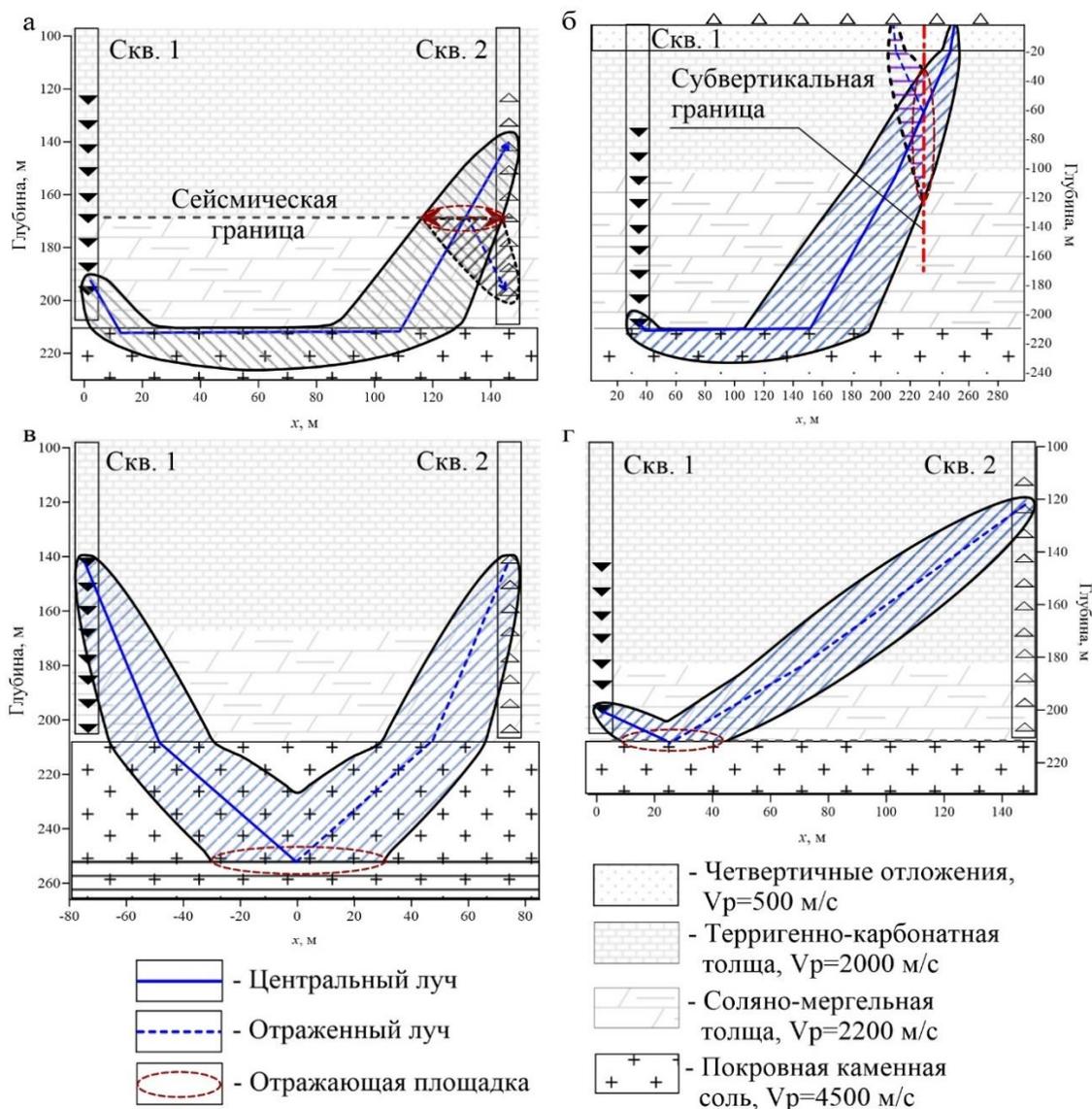


Рисунок 13. Примеры определения размеров отражающих площадок. (а) – преломленно-отраженная волна при МСП, (б) – головная волна в методе ВСП, (в) – отраженная волна от границы в толще солей при МСП, (г) – отраженная волна в надсолевой части при МСП.

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 (DAS – distributed acoustic sensing). Главное преимущество данной технологии заключается в том, что она позволяет на порядок увеличить объем 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 всех классов волн присутствующих в волновом поле скважинных сейсмических наблюдений.

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 волокна². 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 волноводе³. Таким образом, в отличие от стандартных точечных датчиков, регистрируемый параметр усредняется на участке между двумя точками волокна. Расстояние между такими точками называется базой измерения (Gauge Length) и 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 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. Выбор шага дискретизации по пространству определяется характеристиками регистрирующего прибора и может составлять от десятков сантиметров до сотен метров.

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

Системы DAS измеряют деформацию оптоволоконной оси, таким образом, для продольных волн диаграмма направленности определяется как $A = A_0 \cos^2 \alpha$, для поперечных волн $A = A_0 |\sin 2\alpha|$, где α – угол между волокном и вектором распространения волны⁴.

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. Одним из способов выравнивания диаграммы направленности является спиральное уложение волокна в кабеле.

² Parker T., Shatalin S., Farhadiroushan M. Distributed Acoustic Sensing – a new tool for seismic applications // First Break. 2014. Vol. 32(2). P. 61–69.

³ Hartog H. An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors // LLC CRC Press is an imprint. of Taylor & Francis Group, an Informa business. 2017. – 440 p.

⁴ Correa J., Egorov A., Tertyshnikov K., Bona A., Roman R., Dean T., Freifeld B., Marshall S. Analysis of signal to noise and directivity characteristics of DAS VSP at near and far offsets — A CO2CRC Otway Project data example. The Leading Edge, 36. 2017. 994a1–994a7.

Получены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) оптоволоконной распределенной системы для прямого и спирального уложения волокна в кабеле. АЧХ системы со спиральным волокном (рис.14) зависит от нескольких ключевых факторов: интегрирования измеряемого значения (деформации или скорости деформации) вдоль волокна на базе измерения G , угла падения волны на кабель α и угла намотки волокна в кабеле θ (для прямого волокна $\theta = 0^\circ$):

$$A_H(f, \alpha, \theta) = \sum_{\varphi=-\theta}^{\theta} A_G(f, \alpha + \varphi(z)) \Delta z(\varphi) / z, \quad (6)$$

где $A_G(f, \alpha)$ – АЧХ прямого волокна:

$$A_G(f, \alpha) = A_0 \frac{1}{k |\cos \alpha|} (1 - \cos(Gk |\cos \alpha|)) D_P(\alpha), \quad (7)$$

которая в свою очередь зависит от длины волны в массиве $k = 2\pi f/V$, и диаграммы направленности $D_P(\alpha) = A_0 \cos^2 \alpha$. Множитель $\Delta z(\varphi)/z$ выполняет роль весового коэффициента, зависящего от доли участков с фиксированным значением угла падения волны на малый участок волокна φ в общей длине кабеля, растянутого вдоль координатной оси z .

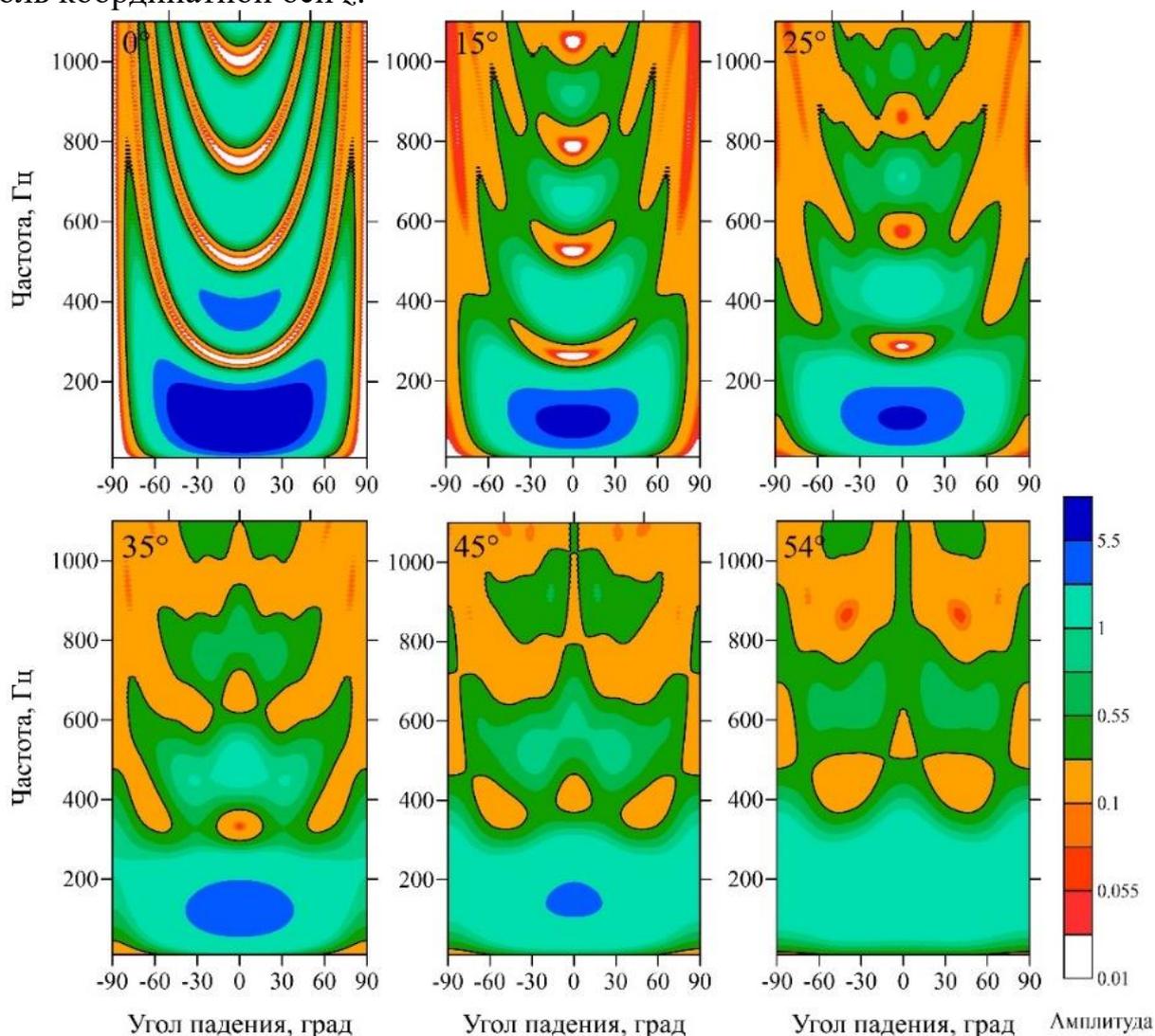


Рисунок 14. Амплитудно-частотные характеристики кабеля для различных углов намотки волокна

Увеличение угла намотки повышает равномерность амплитудно-частотной характеристики продольных волн как по частотам, так и по углам падения. По результатам исследования предложена конструкция кабеля для регистрации широкополосных сейсмоакустических сигналов, с помощью которых можно выполнять сейсморазведочные исследования и решать обширный круг горнотехнических и инженерных задач.

Сравнение гидрофонов и оптоволоконной системы

Испытание кабеля со спиральным уложением волокна позволило экспериментально подтвердить возможность приема акустических сигналов, падающих по нормали к кабелю. 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.

На рисунке 15 приведено сравнение сейсмограмм, полученных гидрофонами, системой DAS спиральным и прямым волокном в сортировке прямого параллельного просвечивания, когда датчик и приемник располагаются на одной глубине.

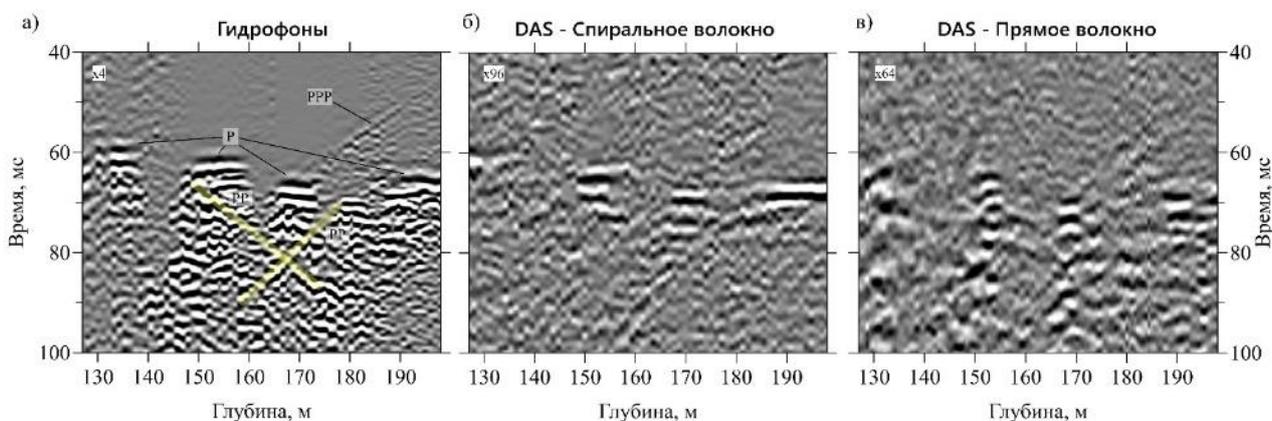


Рисунок 15. Сравнение сейсмограмм параллельного просвечивания, при регистрации с помощью гидрофонов (а) и оптоволоконной системой DAS на спиральном (б) и прямом (в) волокне

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.

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 уверенно регистрировать вступления головной волны в сухой

части скважины, что позволяет использовать его для определения скоростей продольных волн околоскважинного массива даже в сухих скважинах (рис. 16).

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.

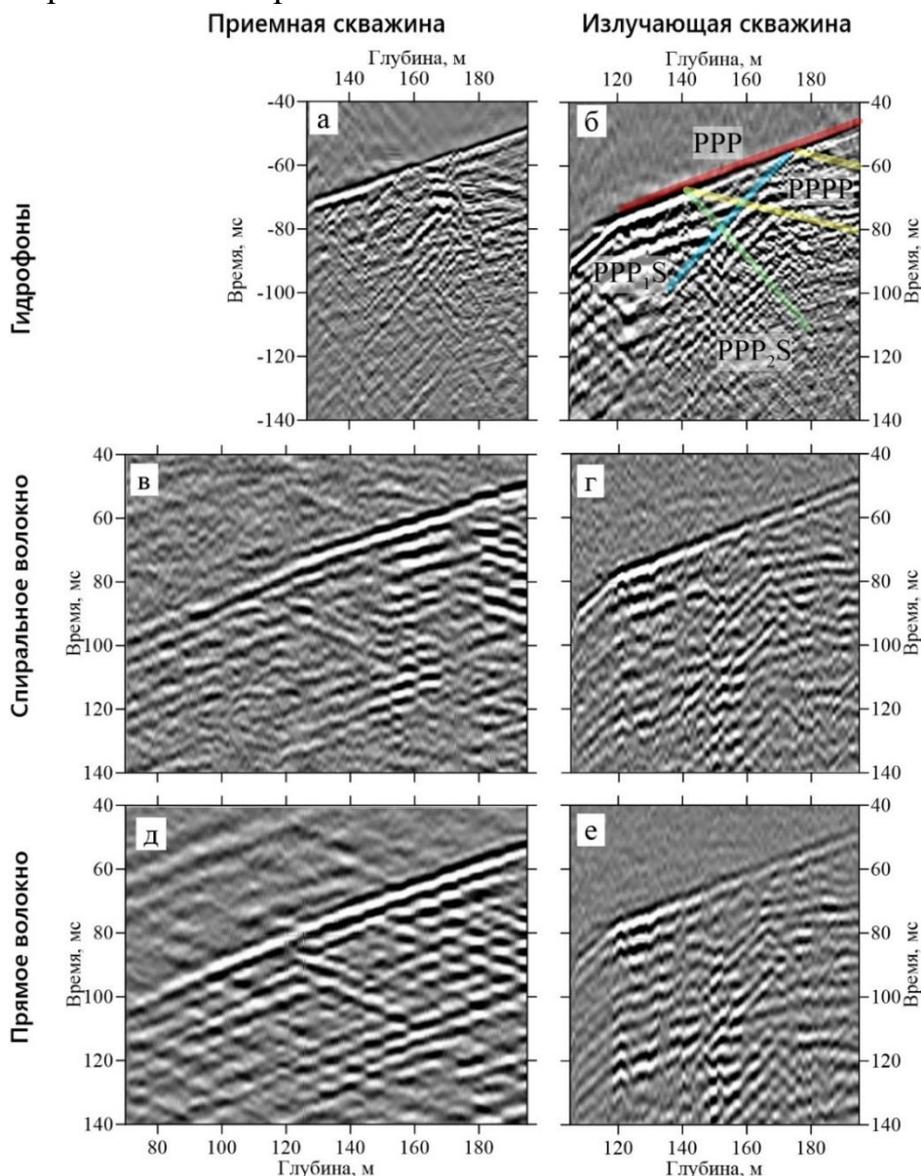


Рисунок 16. Сравнение суммарных сейсмограмм головных волн. а, б – гидрофоны, в, г – спиральный кабель; д, е – прямой кабель. а, в, д – приемная скважина, б, г, е – излучающая скважина. PPP – продольная головная волна, PPPP – продольная головная волна, отраженная от горизонтальной границы, PPP₁S – проходящая обменная головная волна, PPP₂S – отраженно-обменная головная волна.

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 (рис. 17). 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.

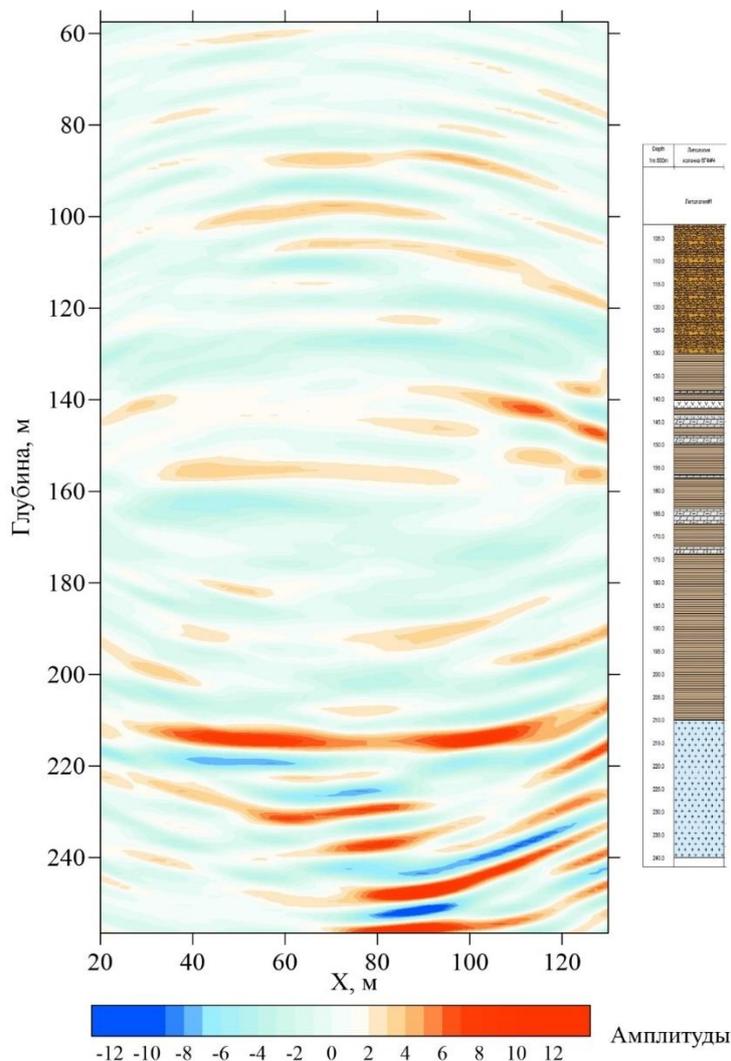


Рисунок 17. Результат миграции отраженных волн при МСП, прямое волокно

Межскважинное просвечивание на малых расстояниях

На малых расстояниях между скважинами (10-20 м) система DAS уверенно регистрирует акустические 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 выносах не менее расстояния между скважинами (рис. 18).

Состав волнового поля межскважинного просвечивания зависит от диаграмм направленности как источника, так и приемника упругих колебаний. Применение систем многократных перекрытий позволяет варьировать состав регистрируемого волнового поля за счет взаимного расположения приемной и возбуждающей линий в зависимости от решаемых задач.

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 (рис. 18, пункт возбуждения S1). 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.

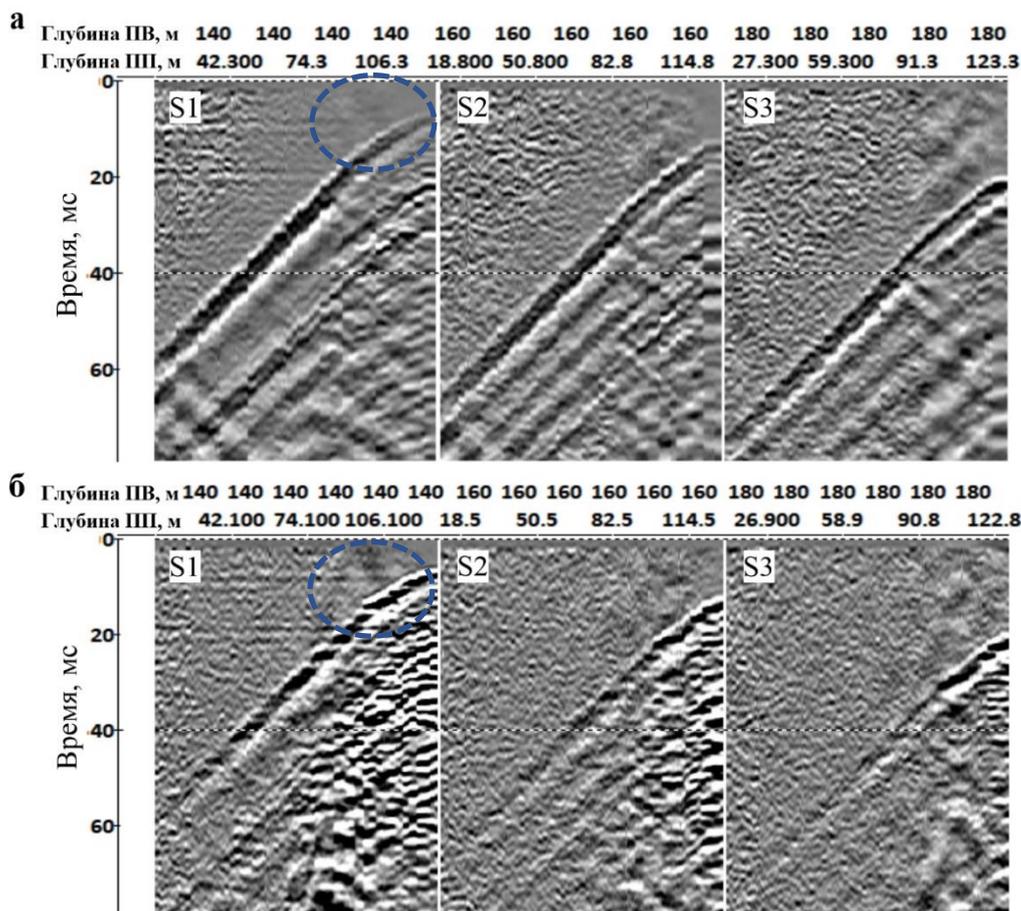


Рисунок 18. Сейсмограммы общего пункта возбуждения межскважинного просвечивания. Прием прямым (а) и спиральным (б) кабелем.

Количественная оценка чувствительности оптоволоконных распределенных датчиков на основании данных межскважинного просвечивания

На основании сравнения записей оптоволоконной системы регистрации и поверенных стандартных сейсмических датчиков получена количественная оценка 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»⁵ в трех вариантах базы измерения (Gauge Length): 5, 7.5, 10 м. В каждом варианте оценивались характеристики волновой картины как с 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.

Сейсмограммы прямого параллельного просвечивания, зарегистрированные гидрофонами, прямым и спиральным волокном представлены на рисунке 19. Частотный состав регистрируемого полезного сигнала находится в пределах 100-700 Гц.

⁵ Alekseev A. E., Vdovenko V. S., Gorshkov B. G., Potapov V. T., Simikin D. E. A phase-sensitive optical time-domain reflectometer with dual-pulse phase modulated probe signal // Laser Physics. 2014. Vol. 24(11).

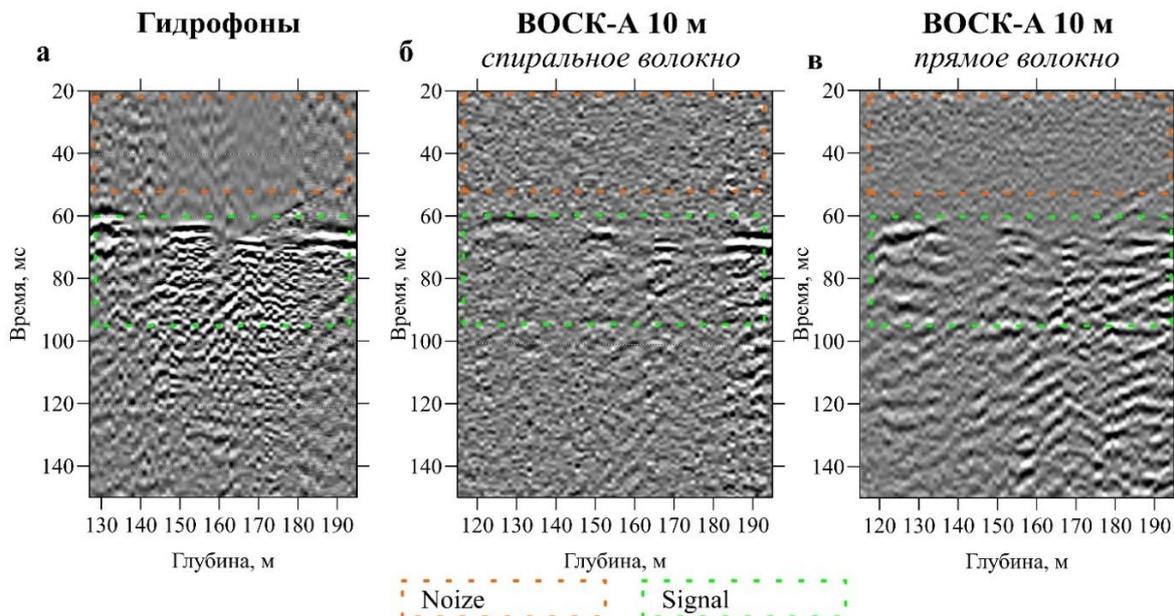


Рисунок 19. Сейсмограммы параллельного просвечивания, зарегистрированные гидрофонами (а) и оптоволоконной системой ВОСК-А со спиральным (б) и прямым (в) волокном

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. Следующим шагом выполнен расчет отношения сигнал-шум $R=(S-N)/N$ по всем наборам данных.

Чтобы сравнить значения параметра R 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 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 (рис. 20). При расчете учтено влияние количества накоплений на одном пункте возбуждения на значение R для разных наборов. В качестве результата выбраны медианные значения полученных наборов отношений (рис. 21).

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. По всей видимости это связано с нелинейным амплитудно-частотным откликом прямого волокна, тогда как для спирального амплитудно-частотный отклик более ровный.

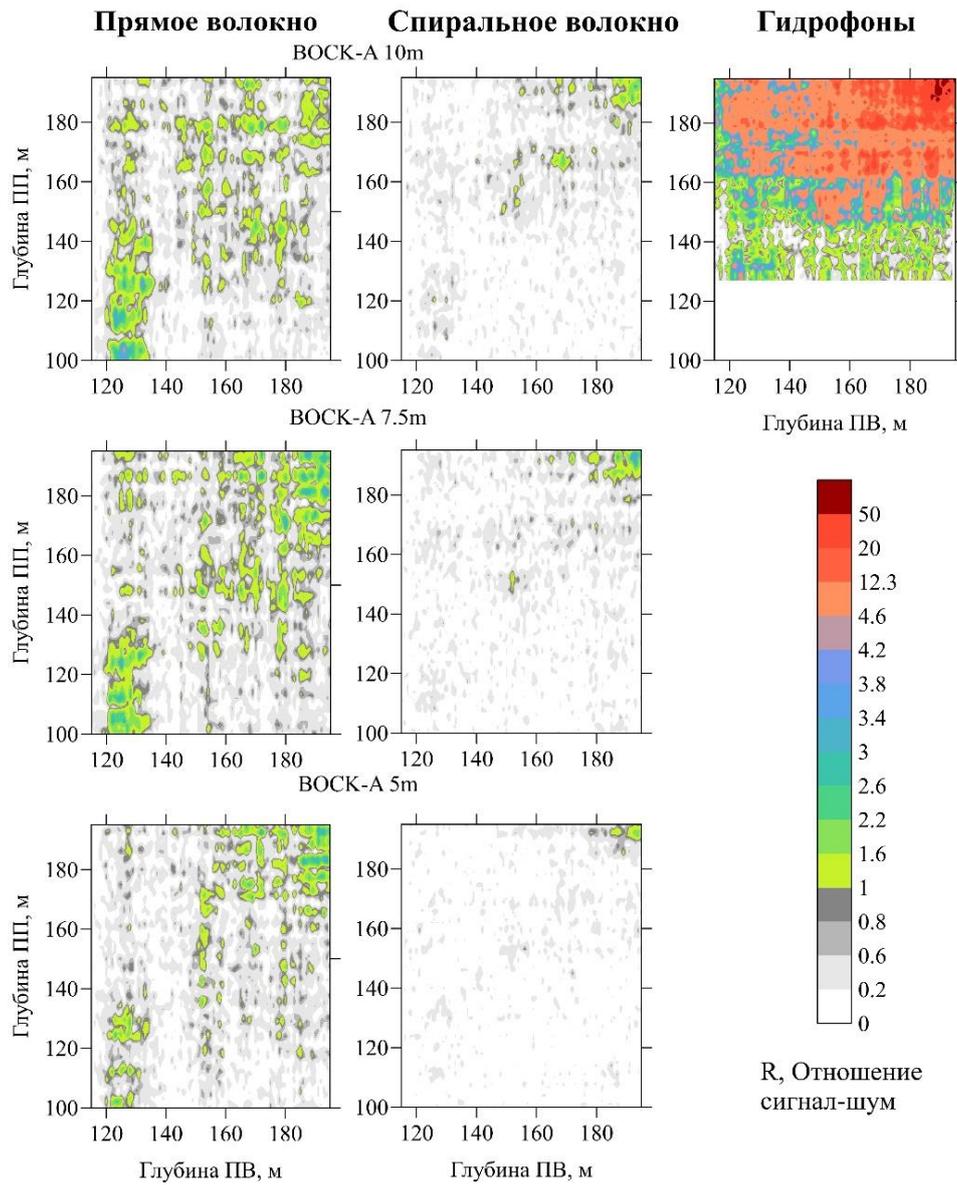


Рисунок 20. Распределения отношения сигнал-шум от глубины источника и приемника для оптоволоконной системы регистрации и гидрофонов

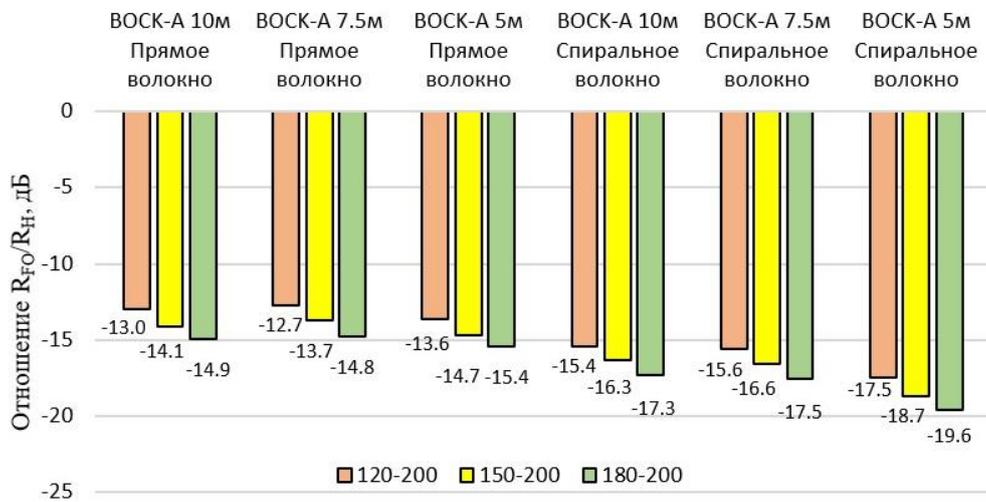


Рисунок 21. Сравнение энергий оптоволоконной системы регистрации и гидрофонов при различной базе измерения и интервале глубин

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 с базой измерения 10 м в диапазоне частот 100-500 Гц чувствительность прямого волокна составляет (-13 .. -15) дБ и (-15 .. -17) дБ для спирального волокна относительно гидрофонов.

Глава 4. Практика применения скважинной сейсморазведки на месторождениях полезных ископаемых

Скважинный мониторинг аварийного участка шахтного поля.

К наиболее сложной группе объектов относятся территории, связанные с аварийными участками шахтных полей. На таких территориях возникает комплекс техногенно-геологических процессов, которые требуют непрерывного контроля состояния породного массива и инженерно-активной зоны в условиях промышленной и городской застройки.

На одном из таких аварийных участков на территории ВКМС наземный сейсморазведочный мониторинг проводится с 1995 года. До 2014 года мониторинг выполнялся ежегодно, с 2014 года интервал наблюдений сократился до трех месяцев, а по некоторым профильным линиям выполняется ежемесячно. С 2018 года наземные сейсмические наблюдения дополняются скважинными.

Комплексные исследования основаны на изучении различных классов волн, регистрируемых при проведении вертикального сейсмопрофилирования и межскважинного сейсмического просвечивания по сети скважин. В результате с помощью трехсторонней томографии на прямых волнах в методе ВСП и МСП по одной паре скважин строятся разрезы скоростей в межскважинном пространстве. Уточнение скоростной модели производится с помощью головных волн, регистрируемых при МСП. 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 (рис. 22).

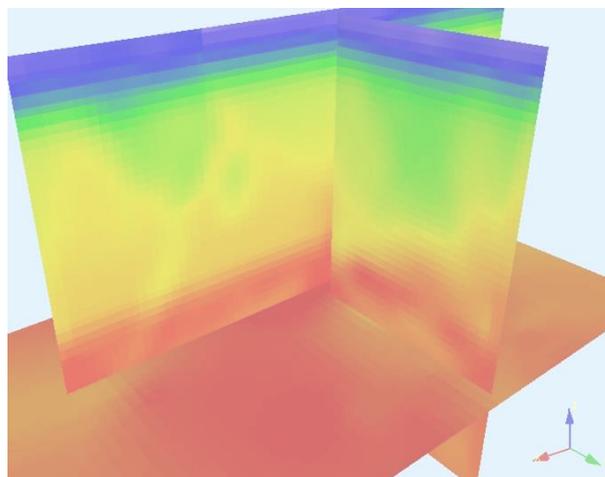


Рисунок 22. *Пространственная визуализация скоростной модели*

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 (рис. 23). Периодическое совместное выполнение скважинных и наземных наблюдений обеспечивает контроль происходящих техногенно-геологических процессов.

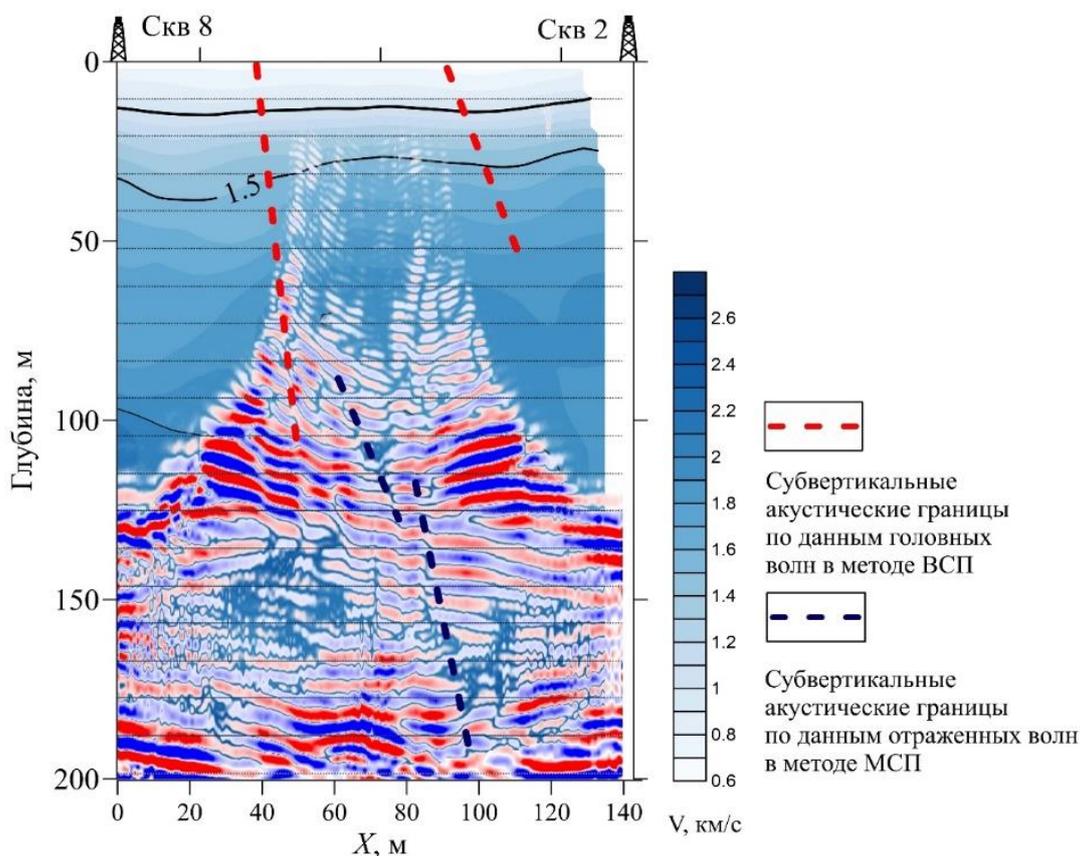


Рисунок 23. Результат интерпретации глубинного разреза по данным отраженных волн в методе межскважинного просвечивания и преломленно-отраженных волн в методе ВСП

При расстояниях между скважинами более 200 м отражения из солевой толщи приходят раньше прямой волны за счет высокой скорости в солях. 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 (рис. 24). Видимая длина волны на разрезе составляет от 7 до 10 м. На глубине 260 м отбивается кровля продуктивной толщи.

Лучевое моделирование показывает, 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.

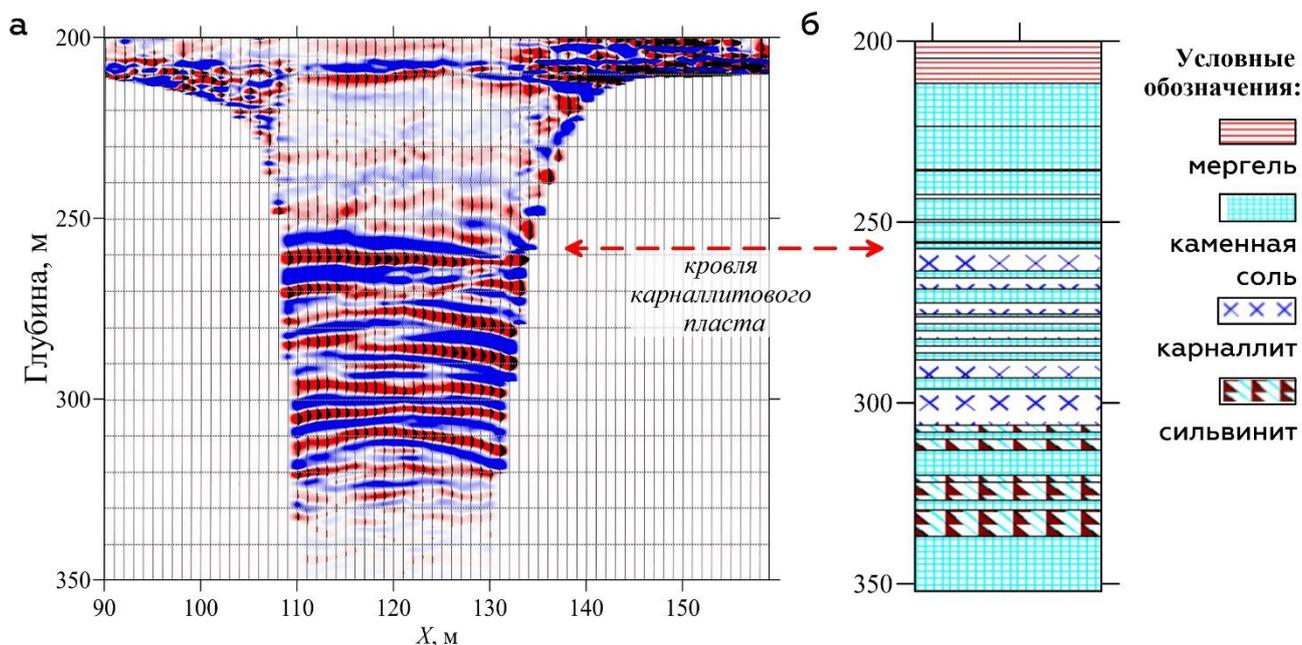


Рисунок 24. Глубинный сейсмический разрез по результатам обработки отраженных волн из солевой толщи, расположенной ниже забоя скважин. Расстояние между скважинами 240 м.

Скважинный мониторинг породного массива с применением распределенных оптоволоконных акустических датчиков

Спроектирована и опробована система мониторинга аварийного участка на Верхнекамском месторождении солей, включающая распределенную оптоволоконную систему регистрации, смонтированную в 4-х кустах скважинах и активный скважинный источник упругих колебаний (рис. 25). Мониторинг выполняется способом межскважинного акустического 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.

Сравнение волновых картин прямой волны дает незначительные отклонения. В то время как для головных волн наблюдаются отклонения времени регистрации до четверти длины волны. Скоростные колонки, построенные по результатам обработки первых вступлений головных волн (рис. 26), 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.

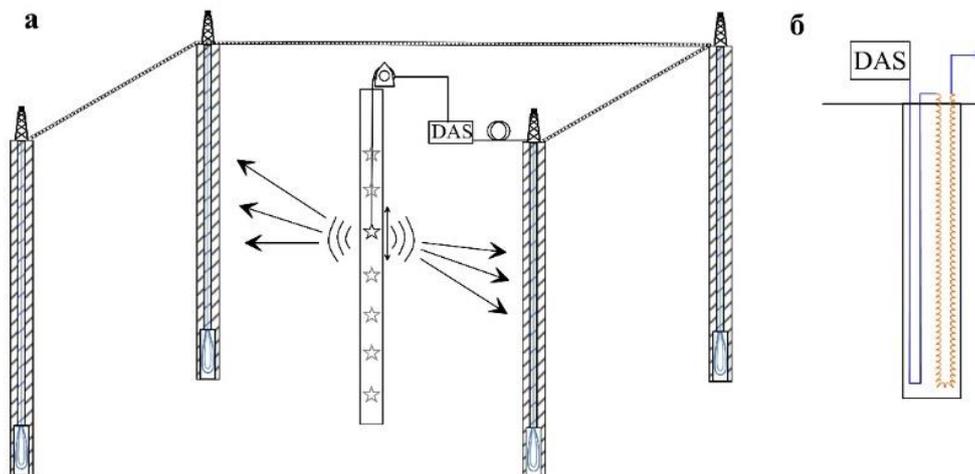


Рисунок 25. Система наблюдений при проведении мониторинга. а - подключение кабеля в скважинах и положение источника. б – схема подключения волокна в одной скважине

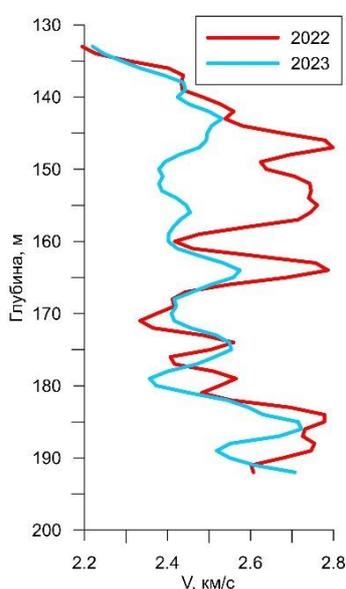


Рисунок 26. Сравнение скоростей продольных волн в околоскважинном пространстве на основании изучения головных волн

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 методик. По результатам наземных исследований в наиболее опасных местах бурятся геофизические наблюдательные скважины. На Верхнекамском месторождении действует сеть из нескольких десятков наблюдательных инженерно-геологических скважин, в которых проводится ежегодный мониторинг 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.

В качестве примера приведены исследования в зоне, выделенной по данным наземной инженерной сейсморазведки (рис. 27). По результатам наземных исследований в терригенно-карбонатной толще (ТКТ) 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.

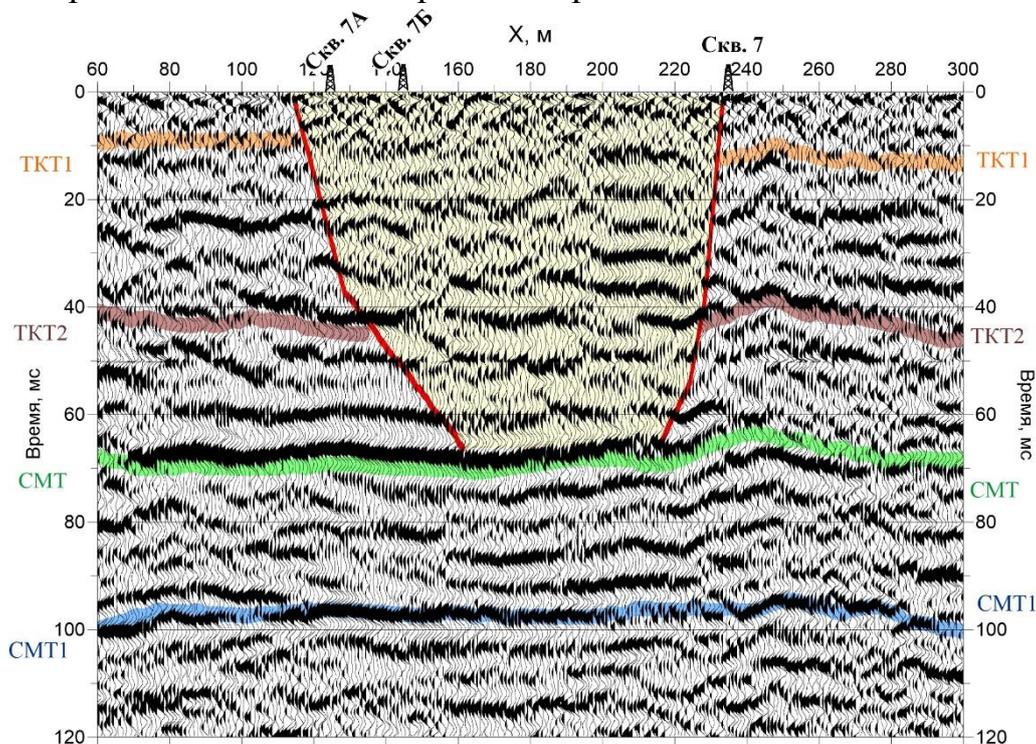


Рисунок 27. Временной разрез по данным наземной инженерной сейсморазведки

Исследования проведены в 3 скважинах, в которых проведены МСП с расстоянием между скважинами 20 и 97 м, а также ВСП. Всего получено 3 разнородных набора данных (рис. 28).

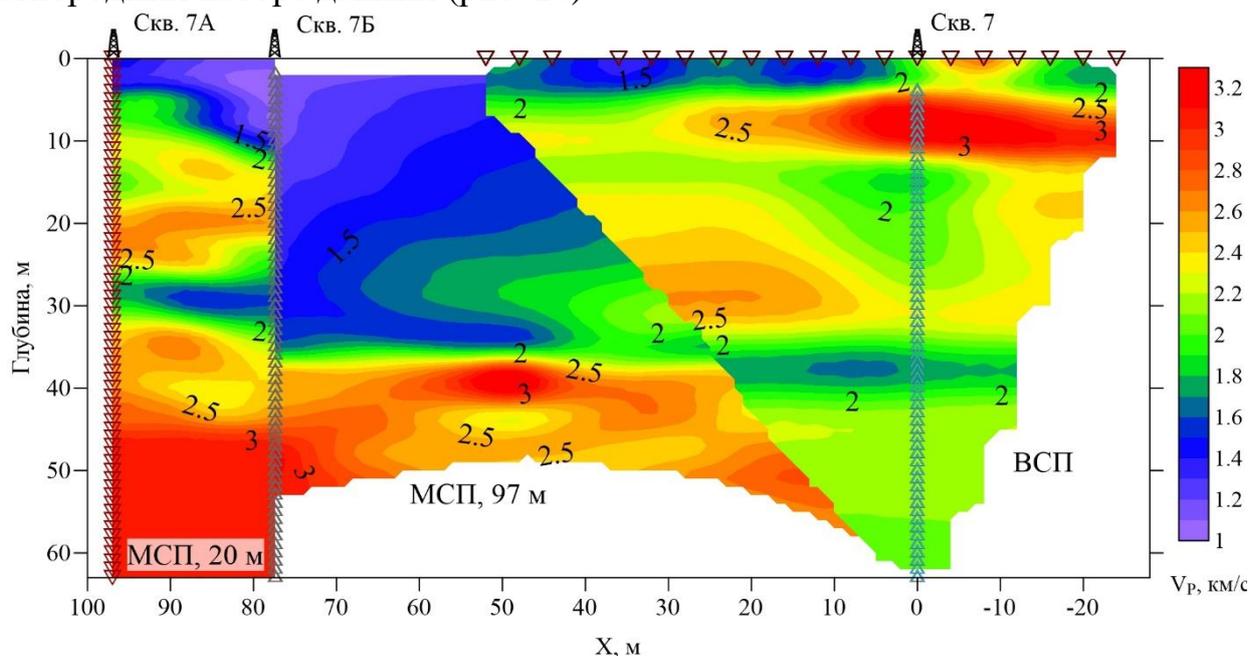


Рисунок 28. Совмещение скоростных разрезов ВСП и МСП

На полученных скоростных разрезах отмечается совпадение максимального градиента скоростей и максимумов амплитуд акустической

контрастности, что является подтверждением корректности полученных результатов. Сравнение полученных изображений с временным разрезом наземной сейсморазведки показывает совпадение структурных элементов. Так, на всех трех изображениях присутствует падение сейсмогеологических границ на восток.

По просвечиванию 7А-7Б с помощью томографии построена скоростная характеристика и выполнена миграция отраженных волн для получения глубинного сейсмического разреза (рис. 29). В качестве входных данных о скоростной модели для выполнения лучевой миграции использована сглаженная скоростная характеристика по данным томографии. В результате, по данным комплексных скважинных сейсмических исследований в пределах участка осложнения волнового поля выделена низкоскоростная зона, позволяющая предположить возможность активизации суффозионных процессов.

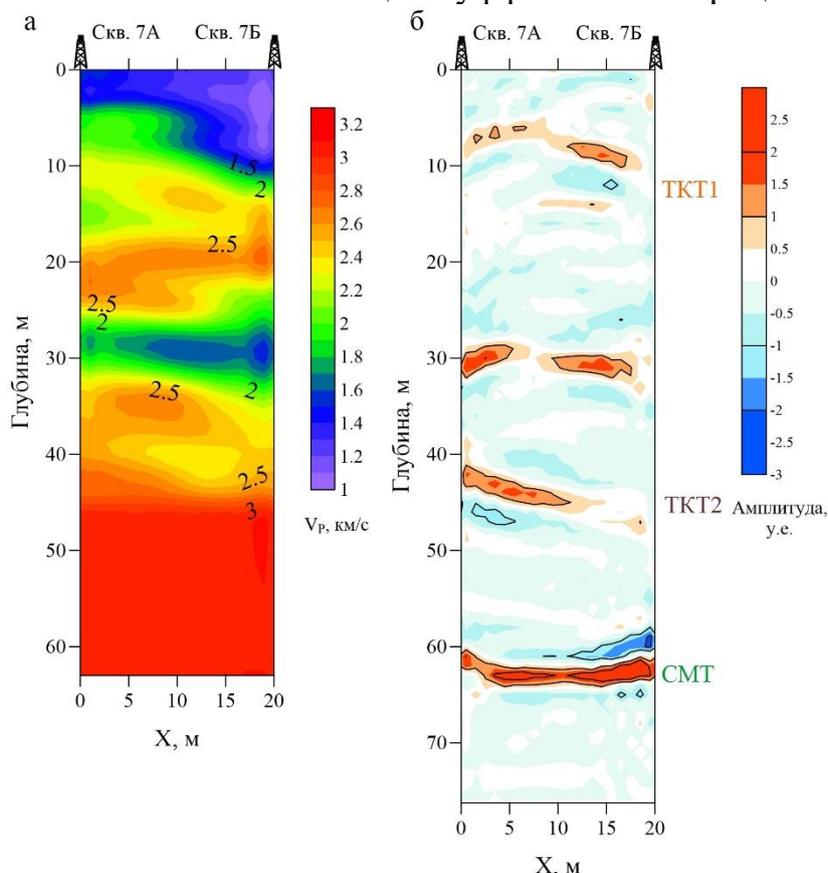


Рисунок 29. Результаты межскважинного просвечивания 7А-7Б. а – скоростное распределение, б – результат миграции отраженных волн.

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 обращенного ВСП по трем профилям. Возбуждение упругих волн осуществлялось в скважине электроискровым источником, прием на поверхности геофонами вертикальной ориентации. Схема наблюдений на рис. 30.

На сейсмограммах ОПВ наблюдается прямая волна P, и на отдельных участках проявляются эффекты отражения и преломления на субвертикальных акустических границах (рис. 31). Так, в районе пикета X=-76 берут начало отраженная волна P₂P, обменно-отраженная волна P₂S, и обменно-преломленная PS. Лучевое моделирование для предполагаемой схемы продольных лучей приведено на рис. 32. В модели заложен низкоскоростной слой мощностью 16 м.

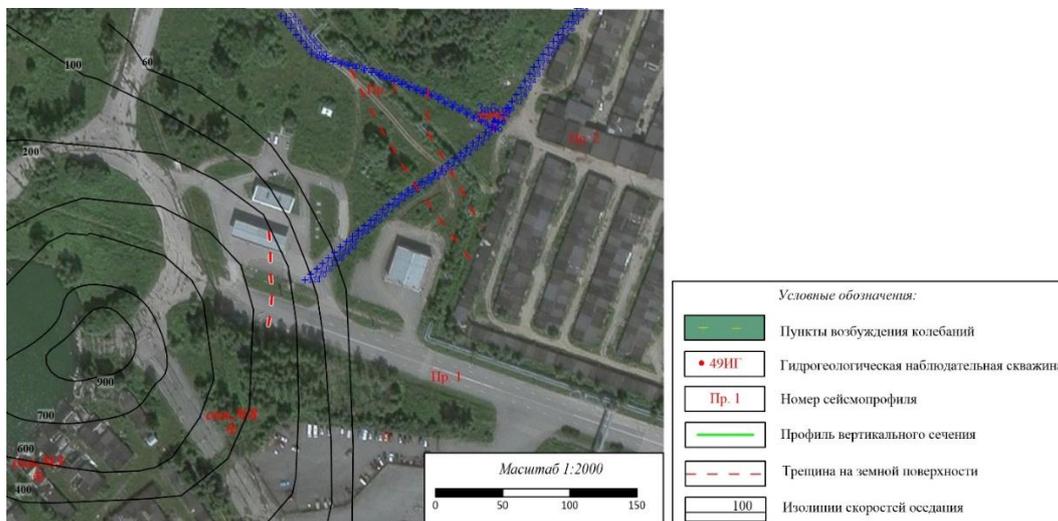


Рисунок 30. Схема пунктов приема

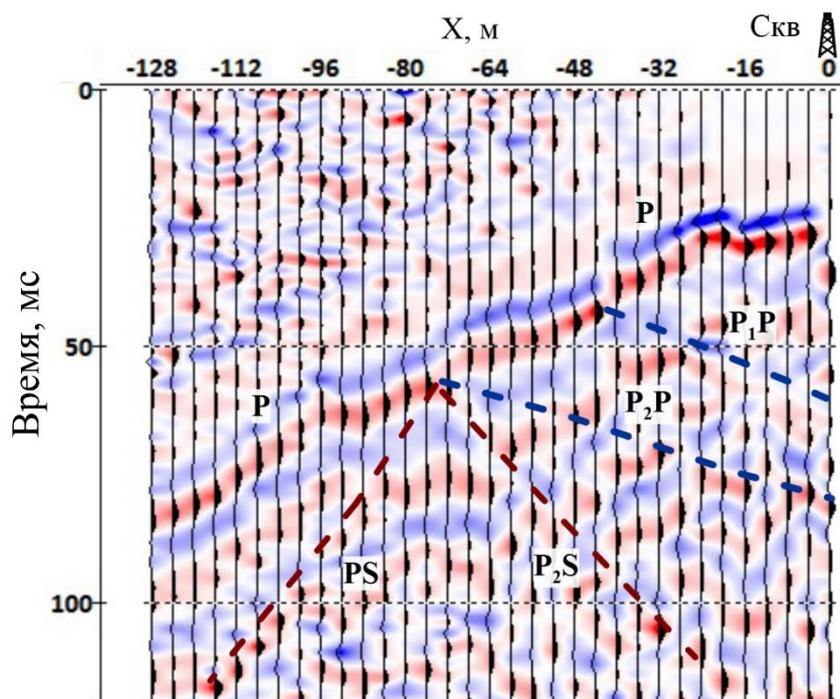


Рисунок 31. Сейсмограмма ОПВ. Источник в скважине на глубине 27 м.

По данным томографии на прямых волнах выполнен расчет скоростной характеристики (рис. 33), 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. В результате построены сейсмические изображения, сведенные на одну плоскость (рис. 34).

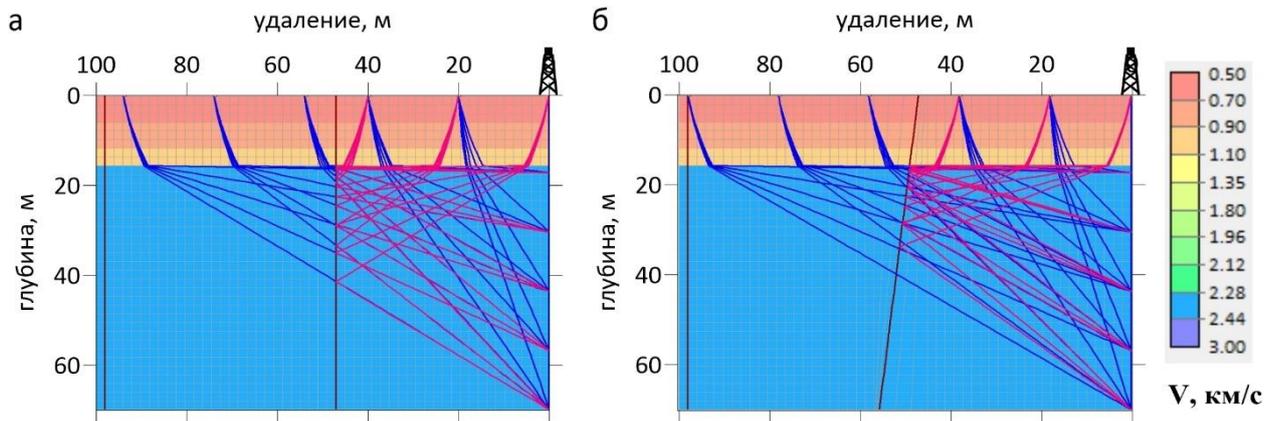


Рисунок 32. Лучевое моделирование отражений продольных волн от субвертикальных границ в методе ВСП. Наклон границы 0° (а), 10° (б).

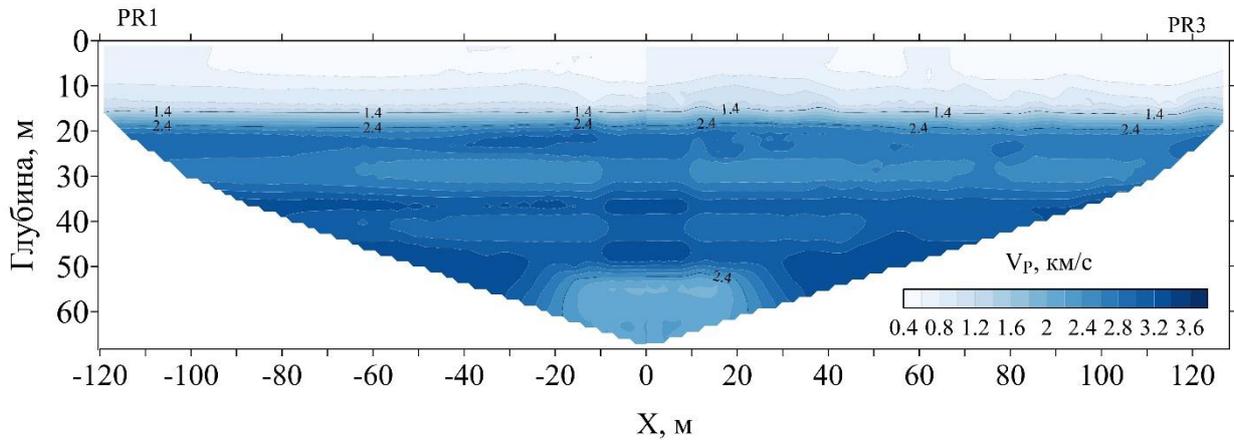


Рисунок 33. Скоростная характеристика по профилям №1 и №3

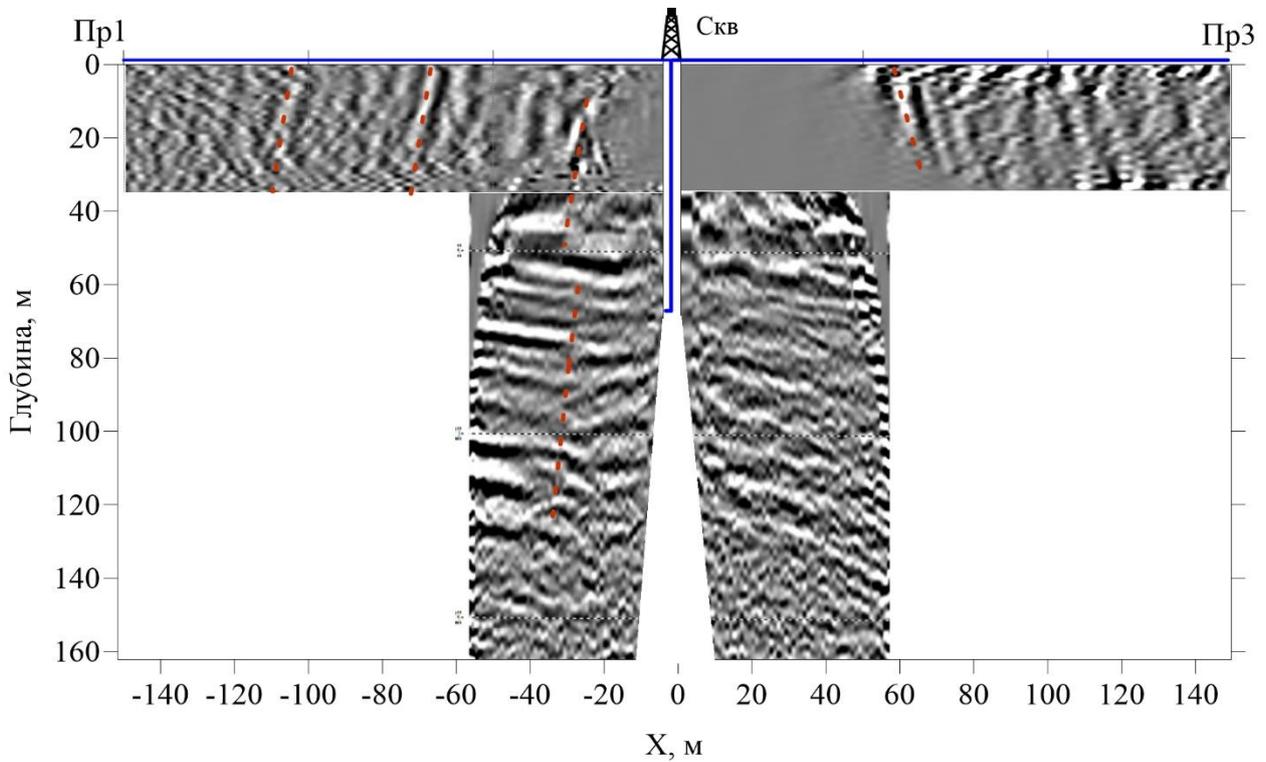


Рисунок 34. Сводный результат миграции непродольного ВСП

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. рис. 30). 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.

Контроль формирования ледопородного ограждения при строительстве шахтных стволов

Отдельным направлением скважинных сейсмических исследований является решение задачи контроля формирования ледопородного ограждения (ЛПО) при проходке шахтных стволов. Традиционным способом контроля формирования ЛПО шахтных стволов и тоннелей является способ межскважинного акустического просвечивания в замораживающих колонках. При этом способ связан с необходимостью отключения подачи хладоносителя и увеличению сроков строительства ствола, кроме того, является весьма трудоемким. Таким образом, изучение способов акустического контроля ледопородного ограждения без использования замораживающих колонок представляется весьма актуальным.

Исследования выполняются комплексом методов, состоящим из межскважинного просвечивания и скважинного профилирования ОГТ, который 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. На основании межскважинного сейсмического просвечивания с помощью томографии на прямых волнах строится распределение скоростей в плоскостях просвечиваний (рис. 35).

Учет кривизны лучей, возникающей за счет высокой акустической контрастности замороженного массива, проводится с помощью поправочного коэффициента, полученного в результате лучевого моделирования хода лучей. Данный коэффициент применяется для коррекции рассчитанной мощности ледопородного массива.

При проведении межскважинного просвечивания после начала замораживания появляется высокоскоростной пакет с кажущейся скоростью намного выше ожидаемой. Полноволновое моделирование показало наличие волны, распространяющейся по замороженному массиву как по

высокоскоростному волноводу. Такая волна может быть использована как индикатор смыкания ЛПО.

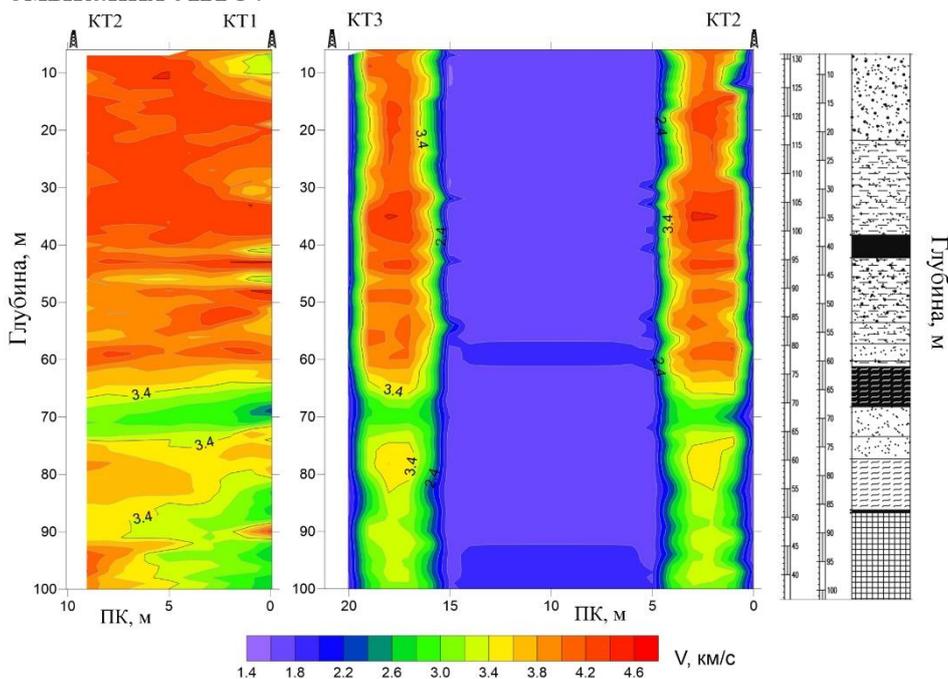


Рисунок 35. Скоростные распределения по результатам расчета томографии, 2-й этап (промежуточный)

Временной сейсмический разрез, получаемый при скважинном профилировании ОГТ в контрольных скважинах, дает изображение положения границы ЛПО и толщины ледопородного ограждения (рис. 36).

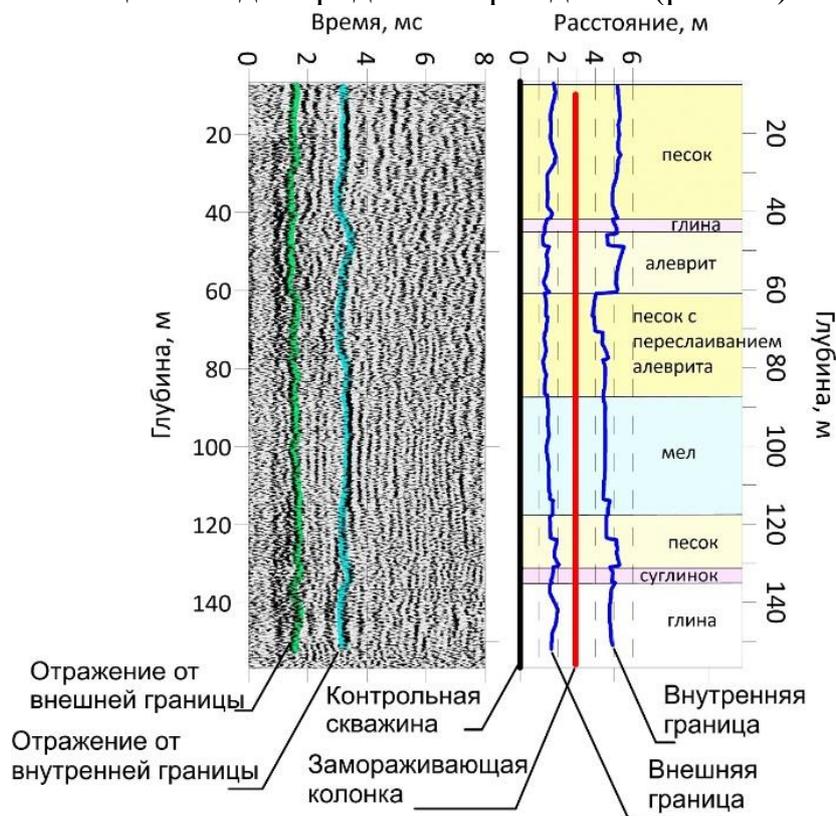


Рисунок 36. Результат обработки и интерпретации скважинного профилирования ОГТ. а – временной разрез, б – построение глубинного разреза с выделением границ сформировавшегося ледопородного ограждения.

Сравнение результатов интерпретации межскважинного просвечивания и скважинного ОГТ между собой, а также с данными термометрического мониторинга⁶, позволяет говорить о высокой степени сходимости, при этом межскважинное просвечивание обеспечивает скоростную характеристику массива, а скважинное ОГТ дает возможность получить волновую картину.

Скважинные исследования в горных выработках

Особую специфику скважинные исследования приобретают при выполнении в горных выработках. Плотный высокоскоростной массив обеспечивает высокий частотный состав и распространение сигнала на значительные расстояния, по сравнению с наземными данными, благодаря чему возможно получение глубинных сейсмогеологических разрезов высокого разрешения.

Расстояние между скважинами 75 м, глубина 350 м. Шаг между пунктами возбуждения 2 м, между пунктами приема 1 м. На рис. 37 приведена сейсмограмма прямого параллельного просвечивания. Верхняя граница частотного спектра прямых и отраженных волн превышает 2000 Гц, несмотря на значительное расстояние между скважинами. При скоростях 6000 м/с это позволяет регистрировать волны с длинами волн от 3 м.

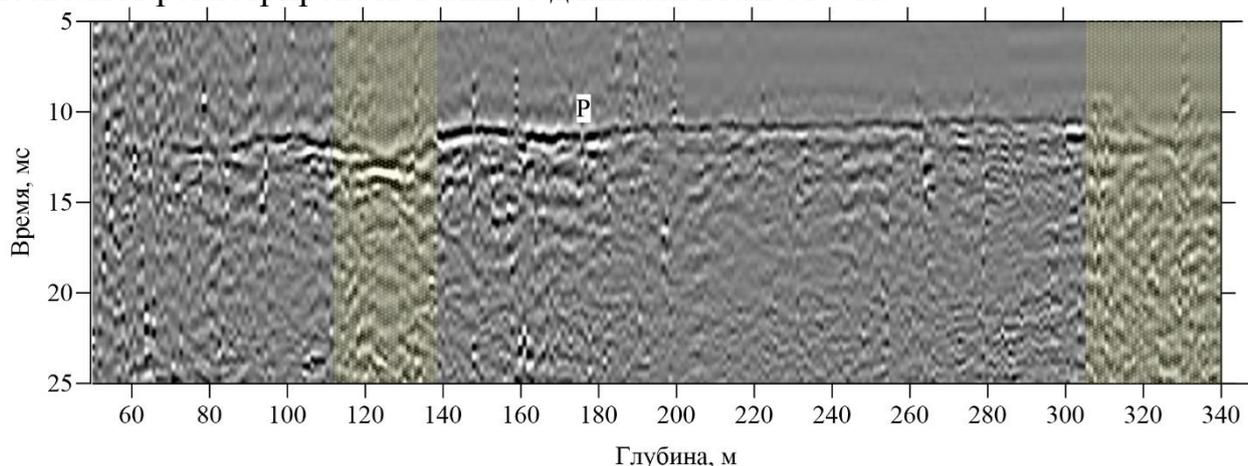


Рисунок 37. Сейсмограмма прямого параллельного просвечивания МСП. Цветным маркером выделены участки повышения времени прохождения прямой волны P.

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 (рис. 38), которая также учитывает геометрию скважин, построенную с помощью инклинометрии.

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 могут представлять повышенную опасность при проходке буровзрывным способом.

⁶ Левин Л.Ю., Семин М.А., Паршаков О.С. Совершенствование методов прогнозирования состояния ледопородного ограждения строящихся шахтных стволов с использованием распределенных измерений температуры в контрольных скважинах // Записки Горного института. 2019. Т. 237. С. 268.

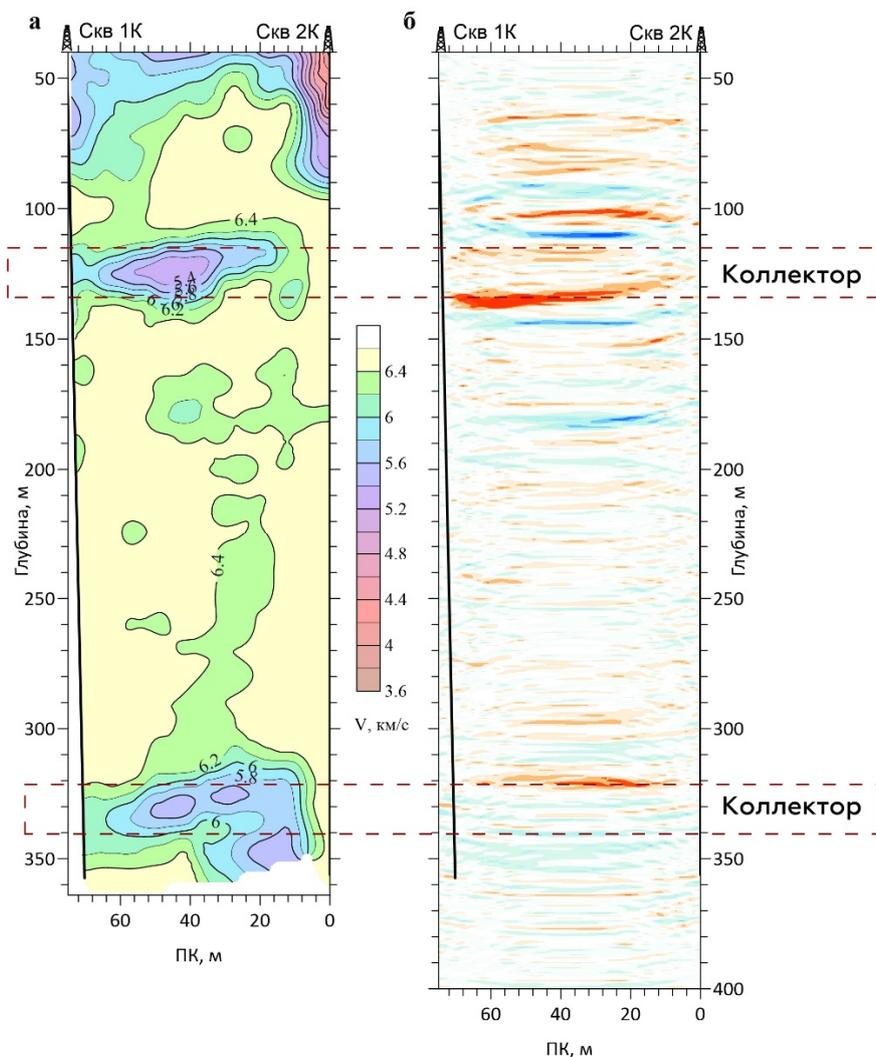


Рисунок 38. Результаты межскважинного просвечивания из горной выработки. а – скоростной разрез; б – глубинный разрез по данным миграции отраженных волн.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Волновые поля, регистрируемые при проведении малоглубинных 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 изучения 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 регистрации 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, путем суммирования головных волн в системе наблюдений ВСП предложен способ обнаружения и пространственной локализации субвертикальных акустически-контрастных границ.

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 волн, распространяющихся по замороженному массиву.

При проведении скважинного профилирования ОГТ, который также можно рассматривать как многоканальный сейсмический каротаж, предложен способ повышения точности определения скоростей продольных 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 использование кабеля со спиральным волокном.

Получена аналитическая зависимость амплитудно-частотной характеристики кабеля со спиральным волокном от 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

сейсморазведочные 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 головные волны. На основании сравнения волновых полей локализуются участки изменения упругих свойств массива и выполняется их количественная оценка.

СПИСОК РАБОТ,

опубликованных автором по теме диссертации публикации в изданиях, утвержденных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации; в изданиях, входящих в международные базы данных Scopus и Web of Science.

1. Шадрин, И. О. Возможности скважинной сейсморазведки при изучении подработанного массива / И. О. Шадрин, А. И. Бабкин, А. В. Чугаев // Горный информационно-аналитический бюллетень, вып. № 5. – М., 2012. – С. 45-50.
2. Санфиоров, И. А. Новые методические решения малоглубинной сейсморазведки на месторождениях водорастворимых полезных ископаемых / И. А. Санфиоров, А. И. Бабкин, А. В. Чугаев, С. В. Ладейщиков // Горный журнал, №6. - М., 2013. – С. 17-22.
3. Lisins, V. P. A study of decompaction zones in soils using the method of non-longitudinal high-resolution VSP / V. P. Lisins, I. A. Sanfirov, A. V. Chugaev, A. I. Babkin, R. N. Seredenko // 77th EAGE Conference and Exhibition 2015. – Madrid, 2015.
4. Chugaev, A. V. A downhole seismic monitoring in the zones of man-made disasters / A. V. Chugaev, A. I. Babkin, V. P. Lisin // 12th Conference and Exhibition Engineering Geophysics 2016, Anapa, 25–29 апреля 2016 года. – Anapa: Curran Associates, Inc., 2016. – P. 452-459.
5. 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 // Тезисы докладов 13-й конференции «Инженерная геофизика – 2017». – Кисловодск, 2017.
6. Санфиоров, И. А. Горнотехнические приложения малоглубинной скважинной сейсморазведки / И. А. Санфиоров, А. В. Чугаев, А. И. Бабкин, В. П. Лисин, В. Ю. Бобров // Геофизика. 2018. №5. С. 24-30.
7. 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. Санфиоров // Тезисы докладов 14-й конференции «Инженерная геофизика – 2018». – Алматы, 2018.
8. 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

- // Тезисы докладов 15-й международной научно–практической конференции «Инженерная и рудная геофизика–2019». – Геленджик, 2019.
9. 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. 2020. – №11. – С.108-117.
10. 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 // Тезисы докладов 16-й международной научно–практической конференции «Инженерная и рудная геофизика–2020». – Пермь, 2020.
11. Санфиоров, И. А. Контроль формирования ледопородного ограждения шахтного ствола комплексом наземных и скважинных сейсморазведочных методов / И. А. Санфиоров, А. Г. Ярославцев, А. В. Чугаев, А. И. Бабкин, Т. В. Байбакова // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 2020, №3. – С. 34-46.
12. 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.
13. Чугаев, А. В. Поиск субвертикальных зон трещиноватости с использованием головных волн в методе вертикального сеймопрофилирования / 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.
14. Chugaev, A. V. 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.
15. 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.
16. Чугаев, А. В. Оценка разрешающей способности преломлённых и отражённых волн при межскважинных исследованиях на основании моделирования объёма Френеля / А. В. Чугаев // Геофизические исследования. – 2023. – Т. 24, № 3. – С. 69-86.
17. 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.
18. 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.
19. Чугаев, А. В. Наземная сейсморазведка на отраженных волнах с помощью распределенных оптоволоконных датчиков акустических сигналов / А. В.

Чугаев, Д. Е. Симикин, Б. Г. Горшков [и др.] // Фотон-экспресс. – 2023. – № 6(190). – С. 288-289.

20. Санфи́ров, И. А. Направления развития сейсморазведочного мониторинга водозащитной толщи действующих соляных рудников / И. А. Санфи́ров, А. В. Чугаев, А. Б. Трапезникова, А. Д. Тезиков // Горный журнал. – 2023. – № 11. – С. 27-31.

Патенты

21. 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. Санфи́ров, А. Г. Ярославцев, А. И. Бабкин, А. В. Чугаев.

22. 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. Санфи́ров, А. И. Бабкин, К. Ю. Томилов.

23. 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. Санфи́ров, А. И. Кузнецов, Р. А. Богданов.

Прочие публикации

24. Чугаев, А. В. Скважинный сейсморазведочный мониторинг на подработанной территории / А. В. Чугаев // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2015. – вып. 13. – С. 185-187.

25. Санфи́ров, И. А. Комплексные геофизические исследования состояния горных пород в основании гидротехнического сооружения / И. А. Санфи́ров, А. Г. Ярославцев, А. А. Жикин, А. И. Бабкин, А. В. Чугаев // Материалы Международной научно-практической конференции и выставки ЕАГО «Инженерная, угольная и рудная геофизика – 2015. Современное состояние и перспективы развития» (20 сентября – 2 октября 2015г). Электронное издание. ЕАГО, г. Сочи, 2015.

26. Чугаев, А. В. Вертикальное сейсмопрофилирование при изучении гидротехнического сооружения / А. В. Чугаев // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2016. – С. 216-217.

27. 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.

28. Чугаев, А. В. Комплексные сейсмические исследования в скважинах в целях мониторинга зон техногенных катастроф / А. В. Чугаев // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2017. – вып. 15. – С. 237-239.

29. Герасимова, И. Ю. Об изменениях сейсмических параметров в пределах верхней части разреза участков ускоренных оседаний / И. Ю. Герасимова, К. Б. Фатькин, А. В. Чугаев // 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. 659-663.
30. 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.
31. Чугаев, А. В. Развитие малоглубинных скважинных сейсморазведочных исследований для обеспечения безопасности ведения горных работ / А. В. Чугаев // Горное эхо. – 2020. – № 2(79). – С. 78-82.
32. Никифорова, А. И. Картирование вертикально-ориентированных зон нарушенности породного массива скважинными и наземными сейсморазведочными исследованиями / А. И. Никифорова, А. В. Чугаев, В. П. Лисин // Горное эхо. – 2022. – № 2(87). – С. 78-84.
33. Лисин, В. П. О возможностях использования техногенных шумов для оценки состояния грунто-породного массива на аварийном участке шахтного поля / В. П. Лисин, И. А. Санфиоров, А. В. Чугаев [и др.] // Инженерная и рудная геофизика 2022 : Сборник материалов 18-ой научно-практической конференции и выставки, Геленджик, 05–08 сентября 2022 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "ЕАГЕ ГЕОМОДЕЛЬ", 2022. – С. 26-35.
34. 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.
35. Чугаев, А. В. Изучение частотного состава сейсмоакустических сигналов при регистрации распределенными оптоволоконными системами DAS / А. В. Чугаев, М. В. Тарантин // ГЕОСОЧИ-2022. Актуальные проблемы геологии и геофизики в нефтегазовой отрасли : Материалы международной научно-практической конференции, Сочи, 25–29 апреля 2022 года. – Тверь: ПолиПРЕСС, 2022. – С. 119-124.
36. Чугаев, А. В. Опыт применения распределенных оптоволоконных акустических датчиков со спиральным волокном для выполнения малоглубинных скважинных сейсмических исследований / А. В. Чугаев // 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. 624-631.
37. Тезиков, А. Д. Решение рудных задач методом межскважинного сейсмоакустического просвечивания / А. Д. Тезиков, А. В. Чугаев // Теория и практика разведочной и промысловой геофизики : сборник научных трудов, Пермь, 23–24 ноября 2023 года. – Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2023. – С. 234-241.
38. Чугаев, А. В. Количественная оценка чувствительности оптоволоконных распределенных датчиков на основании данных межскважинного просвечивания / А. В. Чугаев, Д. Е. Симикин, А. Д. Тезиков // «Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений»: материалы III Всероссийской конференции, посвященной памяти А.А. Соловьева. 25-26 октября 2023 г. М.: ИТПЗ РАН, 2023. с.274-278.

Подписано в печать с электронного оригинал-макета 05.09.2024.

Тираж - 100 экз.

Напечатано в секторе НТП «ГИ УрО РАН»

614007, г. Пермь, ул. Сибирская 78-А

Формат 60x84/16.