

На правах рукописи

Полянский

ПОЛЯНСКИЙ Павел Олегович

**ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ
ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ ЗЕМНОЙ КОРЫ
ПРИ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКЕ
ПРЕЛОМЛЕННЫХ ВОЛН**

1.6.9 – геофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Новосибирск – 2023

Работа выполнена в Алтае-Саянском филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН»

Научный руководитель:

доктор технических наук **Еманов Александр Федорович**

Официальные оппоненты:

Собисевич Алексей Леонидович, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, заместитель директора по научной работе, заведующий лабораторией фундаментальных проблем экологической геофизики и вулканологии, ФГБУН Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук;

Яскевич Сергей Владимирович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмики, ФГБУН Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение “Всероссийский научно-исследовательский геологический институт имени А.П. Карпинского”, г. Санкт-Петербург.

Захита состоится 22 марта 2023 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.087.02, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН), в конференц-зале.

Отзывы в двух экземплярах, оформленные в соответствии с требованиями Минобрнауки России (см. вклейку), просим направлять по адресу: 630090, г. Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3; факс: (8-383) 330-28-07, e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ИНГГ СО РАН:

<http://www.ipgg.sbras.ru/dissertations/polyanskiy2022/dis-Polyanskiy.pdf>
Автореферат разослан 6 февраля 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.г.-м.н., доцент

Неведрова
Нина Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Объект исследования – программно-алгоритмическая составляющая метода динамического пересчета преломленных волн при обработке данных сейсморазведки на опорных профилях.

Актуальность исследования. Сейсмические исследования на опорных профилях выполняются с использованием комплекса систем наблюдения: ГСЗ (глубинное сейсмическое зондирование), МОВ-ОГТ (метод отраженных волн в модификации общей глубинной точки) и КМПВ (корреляционный метод преломленных волн). Данные, полученные системами наблюдения МОВ-ОГТ и ГСЗ, широко используются для определения глубинного строения земной коры и верхней части мантии по отраженным [Горошко и др., 2013; Гошко, Ефимов, Сальников, 2014] и преломленным волнам [Кашубин и др., 2011; Соловьев и др., 2016; Суворов и Мельник, 2018]. Но сейсмическое строение верхней части земной коры (до глубин ~ 3 км) остается недостаточно изученным на опорных профилях. Источником столь важной информации о сейсмическом строении верхней части земной коры и о месторождениях рудных полезных ископаемых в этом диапазоне глубин являются детальные данные продольных и поперечных преломленных волн, регистрируемые системой МОВ-ОГТ. Использование методов прямого лучевого трассирования [Zelt, Smith, 1992] и сейсмической томографии [Крылов и др., 1993; Rawlinson, Pozgay, Fishwick, 2010] для обработки этих данных затруднительно вследствие высокой кратности систем наблюдения (75-100) и плотности данных, составляющей десять миллионов сейсмических трасс на всю длину профиля З-ДВ (2650 км). Для столь значительных массивов данных целесообразно использовать методы цифровой обработки преломленных волн, основы которой заложены в публикациях С.В. Крылова с соавторами [Крылов и Сергеев, 1985; Митрофанов и Сергеев, 1986]. Метод динамического пересчета преломленных волн как дальнейшее развитие методов цифровой обработки данных систем наблюдений с многократными перекрытиями разработан в исследованиях А.Ф. Еманова и В.С. Селезнева [Селезнев и Еманов, 1998; Еманов, Селезнев, Коршик, 2008]. Но до настоящего времени этот метод применялся только на прямолинейных профилях небольшой длины [Коршик, Еманов, Селезнев, 2003; Полянский, Сальников, Еманов, 2014]. Для обработки данных, зарегистрированных на криволинейном протяженном профиле, требуется развитие программно-алгоритмической составляющей метода динамического пересчета с учетом изменений волнового поля, фиксируемых при пересечении профилем границ разных геологических структур. Поэтому, **актуальность исследования** обусловлена необходимостью разработки новых

алгоритмов цифровой автоматизированной обработки данных преломленных волн на основе метода динамического пересчета для определения скоростного строения верхней части земной коры на опорных профилях.

Цель исследования – развитие программно-алгоритмической составляющей метода динамического пересчета преломленных волн для получения новой информации о скоростном строении верхней части земной коры на опорных профилях.

Научные задачи:

1. Дать оценку применимости метода динамического пересчёта преломленных волн для обработки данных систем наблюдения с многократными перекрытиями в условиях криволинейного профиля.

2. Разработать и программно реализовать алгоритм определения областей прослеживания преломленных волн и алгоритм контроля величины рефракции волн вдоль опорного профиля при переходе от временных разрезов к скоростным моделям.

3. С использованием разработанных алгоритмов, по результатам динамического пересчета преломленных волн, зарегистрированных системой наблюдения ОГТ, определить динамические и кинематические характеристики волнового поля, соответствующего верхней части земной коры осадочных бассейнов и складчатых областей на профиле 3-ДВ.

Фактический материал и методы исследования, программное обеспечение. В диссертации использованы сейсмические данные, зарегистрированные детальной системой наблюдения МОВ-ОГТ (расстояние между источниками – 100 м, между сейсмоприемниками – 50 м, максимальная длина расстановки сейсмоприемников – 10 км в каждую сторону от источника) на опорном профиле 3-ДВ длиной 2650 км, пересекающем геологические структуры Центрально-Азиатского складчатого пояса, Сибирской платформы, Предверхоянского краевого прогиба, Сетте-Дабанской складчатой области и Яно-Колымской складчатой системы. Полевые исследования МОВ-ОГТ на опорном профиле выполнялись ОП “Спецгеофизика” ГФУП “ВНИИГеофизика”.

Исследование выполнено на основе развития программно-алгоритмической составляющей методов автоматической селекции сигналов преломленных волн [Крылов и Сергеев, 1985; Митрофанов и Сергеев, 1986]. Основной метод исследования – метод динамического пересчета преломленных волн [Еманов, Селезнев, Коршик, 2008], который включает алгоритмы цифровой обработки данных и используется для построения временных разрезов и сейсмограмм преломленных волн по данным систем наблюдения с многократными перекрытиями.

Для определения кинематических характеристик

зарегистрированного волнового поля, выполнения двумерной F-K фильтрации сейсмограмм и визуализации результирующих временных разрезов использовалось программное обеспечение RADEX-PRO [Буряк и др., 2006]. На основе метода динамического пересчета преломленных волн разработано и реализовано программное обеспечение “Dynmond v1.0” [Полянский и др., 2019], позволяющее выполнить автоматизированную селекцию сигналов преломленных волн с учетом меняющегося вдоль опорного профиля волнового поля. **Высокая степень достоверности результатов** обеспечивается:

- Вычислением спектров когерентности и контролем значений относительной погрешности вычисления АЧХ фильтров динамического пересчета при верификации временных разрезов и сейсмограмм ОПВ, построенных методом динамического пересчета преломленных волн;
- Результатами решения прямых кинематических задач для верификации построенных скоростных разрезов: значения невязок времен между наблюдёнными и теоретическими годографами не превышает 20-30 мс.
- Сравнением построенных соискателем временных и скоростных разрезов с результатами, полученными другими исследователями на профиле 3-ДВ: временными и глубинными разрезами по данным методов отраженных волн и КМПВ, а также структурно-геологическими разрезами.

Защищаемые научные результаты:

1. Кривизна профиля при динамическом пересчете воздействует на выделяемые сигналы преломленных волн как низкочастотный фильтр. Метод динамического пересчета эффективен для обработки данных систем наблюдений ОГТ и ГСЗ в условиях криволинейного профиля.

2. Разработаны и программно реализованы: алгоритм контроля областей прослеживания и алгоритм контроля величины рефракции преломленных волн вдоль опорного профиля. Развит подход к переходу от временных разрезов к скоростным моделям.

3. Волновые поля преломленных волн, полученные как результат динамического пересчета, отражают особенности строения земной коры до глубины ~3 км вдоль профиля 3-ДВ: в областях Нижнеалданской впадины и Предверхоянского прогиба зафиксированы преломляющие границы в осадочном чехле и частично поверхность фундамента Сибирской платформы; в Сетте-Дабанской и Верхояно-Колымской складчатых областях прослежены пологозалегающие преломляющие границы с наличием рефракции волн.

Научная новизна

1. Дифференцированием функции разности нагоняющих годографов преломленных волн получено выражение для вычисления амплитудно-

частотных характеристик фильтров пересчета с учетом параметров кривизны профиля. С использованием полученного выражения доказано, что кривизна профиля влияет на сигналы преломленных волн при динамическом пересчете как низкочастотный фильтр.

2. С использованием полученного выражения оценено влияние криволинейного профиля на динамический пересчет преломленных волн по разным системам наблюдения на профиле 3-ДВ:

- При динамическом пересчете данных систем наблюдений ОГТ и ГСЗ на результирующих временных разрезах понижение амплитуды не превышает 15% в полосе частот опорных волн 12-40 Гц;
- При динамическом пересчете данных системы КМПВ понижение амплитуды составляет 70-100% в полосе частот опорных волн 12-40 Гц.

3. Разработан и программно реализован алгоритм определения областей прослеживания преломленных волн на основе динамического пересчета волнового поля в сейсмограммы общего пункта возбуждения ($i=const$) и автоматического контроля изменения областей прослеживания волн вдоль профиля по значениям $\Delta x/\Delta t$, вычисляемым в окнах ΔL_1 и ΔL_2 .

4. Разработан и программно реализован алгоритм контроля рефракции волн в подстилающую толщу, основанный на вычислении частотных спектров трасс временных разрезов $L=const$. По результатам сравнения значений частот в спектрах исходных трасс и в спектрах трасс результирующих временных разрезах оценена величина рефракции волн в верхней части коры структур вдоль профиля 3-ДВ.

5. С использованием разработанных алгоритмов обработки данных преломленных волн определены особенности сейсмического строения верхней части земной коры (до глубин ~3 км) в геологических структурах (Сибирская платформа, Предверхоянский краевой прогиб, Сетте-Дабанская складчатая область), пересекаемых профилем 3-ДВ. По изменению значений отношения скоростей продольных и поперечных волн выявлена блочная структура верхней коры в Яно-Колымской складчатой системе.

Личный вклад соискателя состоит в разработке и программной реализации алгоритмов на основе метода динамического пересчета преломленных волн. С использованием разработанного программного обеспечения “Dymond v1.0” соискателем выполнена цифровая обработка сейсмических данных преломленных волн, зарегистрированных системой МОВ-ОГТ на профиле 3-ДВ и сделана интерпретация полученных результатов. Соискатель принимал непосредственное участие в регистрации сейсмических данных на опорном профиле 3-ДВ и написании научных статей по теме диссертации. Соискатель участвовал в подготовке публикаций – в оформлении графического материала и подготовке текста.

Теоретическая и практическая значимость результатов.

Разработанные алгоритмы и реализованное программное обеспечение позволили повысить производительность цифровой обработки данных преломленных волн на опорном профиле 3-ДВ. Для построения временных разрезов и скоростных моделей по всей длине профиля требуется несколько недель работы и это при плотности данных, равной десяти миллионов сейсмических трасс на 2650 км длины профиля 3-ДВ.

Разработанные алгоритмы дали возможность автоматически определять области прослеживания преломленных волн в разных тектонических блоках, пересекаемых профилем и вычислять величину коэффициентов рефракции преломленных волн в подстилающей толще. С использованием этих алгоритмов построены скоростные разрезы и определено сейсмическое строение верхней части земной коры на участках профиля 3-ДВ. Полученные в диссертации результаты подтверждают мнение ряда исследователей [Имаева и др, 2006; Черкасов, Сальников, Гошко, 2013; Старосельцев, 2015; Третьяков и Прокопьев, 2015] о надвиговой структуре зоны сочленения Сибирской платформы и Верхояно-Колымской складчатой области. Построена скоростная модель верхней коры вдоль Северо-Восточного участка профиля 3-ДВ по данным продольных и поперечных волн [Полянский, Еманов, Сальников, 2021]. Полученная информация о изменениях значений отношения скоростей Р- и S- волн в верхней коре актуальна для металлогении Магаданской области и республики Якутия.

Апробация. Основные результаты исследования представлены научному сообществу, докладывались и получили одобрение специалистов на международных и всероссийских конференциях: “50 лет сейсмологического мониторинга Сибири” (2013), “Геофизические методы исследования земной коры. Всероссийская конференция, посвященная 100-летию со дня рождения академика Н.Н. Пузырева” (Новосибирск, 2014), “Сейсмические технологии” (Москва, 2016), “Интерэкспо ГеоСибирь” (Новосибирск, 2016-2021), “Гео-Байкал-2016 - расширяя горизонты” (Иркутск, 2016), международной сейсмологической школе “Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных” (Душанбе, респ. Таджикистан, 2018; Новосибирск, 2021), всероссийской научно-практической конференции молодых ученых “Науки о земле. Современное состояние” (Шира, респ. Хакасия, 2017), на школах-конференциях молодых ученых: Екатеринбург, (2014, 2016, 2018); Пермь, (2015, 2017); Иркутск, (2017). Часть защищаемых научных результатов получена в рамках Проекта РФФИ “Эврика! Идея” №17-35-80026, выполненном под руководством соискателя.

Публикации. Соискателем опубликовано 27 работ по теме

диссертации. Из них: 5 статей в журналах из перечня ВАК, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, 21 статья – в журналах и сборниках материалов конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 175 источников. Полный объем диссертации составляет 148 страниц, включая основное содержание, 67 рисунков и 1 таблицу.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность доктору технических наук Еманову Александру Федоровичу за научное руководство, постоянное внимание и неоценимую помощь на всех этапах подготовки работы.

Автор глубоко благодарен коллективу АСФ ФИЦ ЕГС РАН – к.г.-м.н. Соловьеву В.М, д.г.-м.н. Селезневу В.С., к.г.-м.н. Еманову А.А., к.ф.-м.н. Фатееву А.В., Баху А.А. за важные рекомендации и обсуждение полученных результатов. За помошь в разработке программного обеспечения “Dynmond v1.0” автор признателен Дураченко А.В.

За предоставленные данные МОВ-ОГТ, за ценные советы при подготовке научных статей автор благодарен д.г.-м.н. Сальникову А.С. За важные рекомендации при геологической интерпретации полученных результатов и подготовке текста диссертации автор искренне признателен д.г.-м.н. Полянскому О.П. За ценные советы и конструктивную критику автор благодарен д.т.н. Колесникову Ю.И., к.ф.-м.н. Дучкову А.А., д.т.н. Виноградову Ю.А., д.т.н. чл.-корр. РАН А.А. Маловичко, д.г.-м.н. чл.-корр. РАН И.Ю. Кулакову, д.ф.-м.н. Протасову М.И., д.г.-м.н. Суворову В.Д., д.ф.-м.н. Митрофанову Г.М., к.ф.-м.н. Дучкову А.А., к.г.-м.н. Мельник Е.А., Самойловой В.И.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** определен объект и обоснована актуальность исследования, поставлены цель и научные задачи, описаны методы исследования. Сформулированы защищаемые научные результаты, показана их новизна и личный вклад соискателя. Определена теоретическая и практическая значимость результатов.

В **первой главе** представлен обзор существующих методов и алгоритмов обработки и интерпретации данных сейсморазведки и обозначен круг задач, решаемых этими методами. Приведен сравнительный анализ достоинств и недостатков методов при исследовании земной коры в разных диапазонах глубин.

Вторая глава посвящена обзору известных публикаций, посвященных исследованию геологического строения верхней части земной коры вдоль профиля З-ДВ.

Опорный профиль 3-ДВ проходит через осадочные бассейны (Соловьевский прогиб, Чульманская впадина, Среднеленская моноклина, Вилюйская синеклиза, Нижнеалданская впадина) и через складчатые системы (Становая, Яно-Колымская, Сетте-Дабанская), [Парfenов и др., 2003]. Северо-Восточный участок профиля пересекает зону сочленения Европейской и Охотоморской литосферных плит [Соловьев и др., 2016]. С запада на восток, как мы видим на рисунке 1, **Северо-Западный** участок профиля 3-ДВ (1400-2100 км) пересекает две крупные тектонические структуры: восточную часть Сибирской платформы и западную часть Яно-Колымской складчатой системы, а также ряд структур меньшего размера.



Рисунок 1 – Тектоническая схема полосы Северо-Западного участка профиля 3-ДВ ([Тектоника ..., 2001], с дополнением).

Линия Северо-Западного участка профиля 3-ДВ поочередно, с запада на восток проходит через часть Нижнеалданской впадины (1350-1570 км), Предверхоянский краевой прогиб (1570-1620 км), Сетте-Дабансскую складчатую область (1620-1720 км) и западную часть Яно-Колымской складчатой системы (1720-2100 км).

Часть Нижнеалданской впадины, выделяемой Г.Н. Черкасовым в северо-восточной части Сибирской платформы, пересекается отрезком профиля 3-ДВ 1350-1570 км. Впадина составлена молодыми осадочными породами олигоцен-четвертичного периода общей мощностью ~1 км [Черкасов, Сальников, Гошко, 2013].

Предверхоянский прогиб ограничен с юга Нижнеалданским разломом, пересекаемым профилем на отметке 1570 км. Прогиб сложен мелководными морскими, континентальными обломочными и вулканогенно-осадочными породами юрского и мелового периодов. Общая мощность осадочного чехла в пределах прогиба превышает 8 км [Пущаровский, 1959; Суворов и Мельник, 2019]. Окраинный разлом, пересекаемый профилем на отметке 1625 км, отделяет северо-восточную часть Предверхоянского краевого прогиба от Сетте-Дабанской складчатой области.

Сетте-Дабанская складчатая область пересекается профилем на отрезке 1625-1720 км. Верхняя часть земной коры сложена деформированными в складки осадочными породами карбонатного состава, мелководного и глубоководного, а также вулканогенно-осадочного генезиса, присутствуют интрузии пород основного и ультраосновного состава, также присутствуют интрузии пород основного и ультраосновного состава. В пределах области широко распространены месторождения полезных ископаемых - руды меди, золота, тантала, ниобия [Старосельцев, 2015]. Сетте-Дабанская область в ее восточной части граничит с западной частью Верхояно-Колымской складчатой системы. Зона сочленения проходит по Бурхалинскому разлому [Тектоника ..., 2001], пересекаемому линией Северо-Западного участка профиля 3-ДВ на отметке 1720 км. По результатам некоторых исследователей [Имаева и др., 2006; Черкасов, Сальников, Гошко, 2013; Горошко и др., 2016; Третьяков и Прокопьев, 2015], Сетте-Дабанская область имеет природу надвиговой структуры в зоне сочленения Сибирской платформы и Яно-Колымской складчатой системы.

Третья глава посвящена особенностям метода динамического пересчета [Еманов, Селезнев, Коршик, 2008] преломленных волн при его использовании для обработки данных, зарегистрированных на опорных профилях. Преломленные волны когерентны по пространству, это проявляется в параллельности их нагоняющих гидографов. Динамический пересчет является интерференционной системой суммирования сигналов преломленных волн в трассах с заданными на системе наблюдений координатами. Рисунок 2 иллюстрирует область информации, используемой при пересчете волнового поля в точку на обобщенной плоскости и шаги последовательного пересчета волнового поля преломленной волны. С использованием формулы (1) выполняется селекция сигналов преломленных волн и подавление сигналов волн остальных типов (отраженных, дифрагированных и т.д.) и случайных помех.

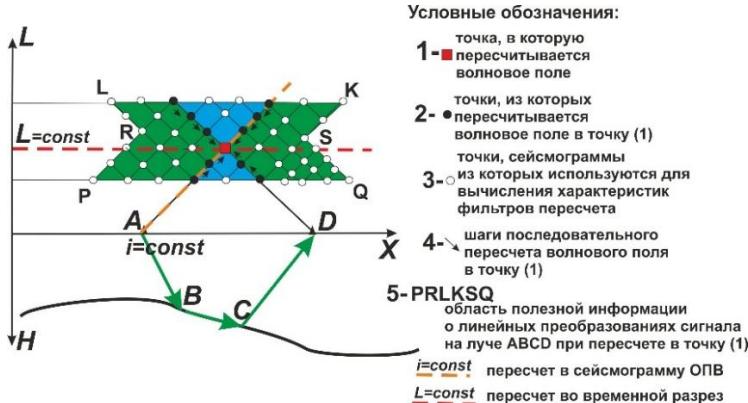


Рисунок 2 – Область полезной информации и схемы динамического пересчета волнового поля во временные разрезы и сейсмограммы ОПВ.

$$F_i^j(\omega) = S_{i+1}^j(\omega) \frac{\sum_a [S_i^{j+a}(\omega) S_{i+1}^{j+a}(\omega)^*]}{\sum_a |S_{i+1}^{j+a}(\omega)|^2} \quad (1)$$

В сейсмограммах области PRLKSQ содержится информация о линейных преобразованиях сигнала головной волны вдоль луча ABCD, автоматически извлекаемая при пересчете волнового поля из точек (2) в точки (1), (см. рисунок 2). Пересчет при последовательном смещении точек (1) вдоль оранжевой линии $i=const$ позволяет получить сейсмограмму ОПВ, при смещении точек (1) вдоль красной линии $L=const$ строится временной разрез. Принципиальное отличие временных разрезов по преломленным волнам от результатирующих временных разрезов метода ОСТ в том, что в нашем случае извлекается информация о линейных преобразованиях сигналов в среде вдоль лучей головной волны, а в методе ОСТ извлекается информация об элементах отражающей границы.

На опорных профилях неизменно присутствует эффект рефракции волн и криволинейность профиля, поэтому параллельность нагоняющих гидографов нарушается. Для учета влияния непараллельных нагоняющих гидографов, комплексный спектр результатирующего сигнала при динамическом пересчете можно представить так:

$$S_i^j(\omega) = F_{i+1}^j(\omega) \cdot h_{opt}(\omega) \cdot \sum_{a=1}^n \exp(i\omega\theta_a), \quad (2)$$

здесь $F_{i+1}^j(\omega)$ - комплексный спектр пересчитываемого сигнала, $h_{opt}(\omega)$ - АЧХ фильтра Винера, θ_a - показатель непараллельности нагоняющих годографов. Выражение (2) свидетельствует, что непараллельность нагоняющих годографов влияет на спектры результирующих сигналов при динамическом пересчете эквивалентно низкочастотному фильтру [Полянский, Еманов, Сальников, 2018].

Влияние параметров кривизны линии профиля З-ДВ на вычисление фильтров динамического пересчета. Способ количественной оценки влияния кривизны профиля на результаты обработки методом динамического пересчета основан на рассмотрении функции линии профиля $Y(X)$ в параметрическом виде:

$$Y(X) = A \sin(BX), \quad Y'(X) = AB \cos(BX) \quad (3)$$

где A, B – параметры, определяющие кривизну линии профиля.

Показатель непараллельности нагоняющих годографов, как доказано Н.Н. Пузыревым в [Пузырев, 1960] - это производная функции их разности. Для случая криволинейного профиля, показатель непараллельности вычисляется дифференцированием функции двух переменных:

$$\theta_a = (\Delta t(X, Y(X)))' = \frac{d(\Delta t)}{dX} + \frac{d(\Delta t)}{dY} \cdot \frac{dY}{dX} \quad (4)$$

С использованием формул (1) - (4) вычислены значения амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) фильтров пересчета с учетом параметров кривизны профиля и параметров системы наблюдения. Примеры графиков АЧХ фильтров пересчета, построенных по материалам системы наблюдений ОГТ на профиле З-ДВ, продемонстрированы на рисунке 3.

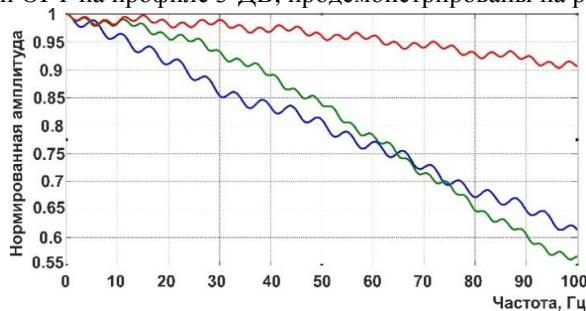


Рисунок 3 - Графики АЧХ фильтров пересчета с учетом влияния криволинейности Центрального участка профиля З-ДВ.

Значения АЧХ в полосе частот сигналов преломленных волн 12-40 Гц превышают 0.85 при любых значениях параметров A и B . Это

свидетельствует, что в условиях системы наблюдений ОГТ кривизна профиля лишь незначительно влияет на динамический пересчет. Аналогичная ситуация наблюдается и в случае пересчета данных системы ГСЗ [Полянский, Еманов, Сальников, 2018]. Аналогичными расчетами доказывается, что динамический пересчет данных КМПВ на криволинейном профиле в большинстве случаев неэффективен – понижение амплитуд сигналов составляет 80-100%. Поэтому в условиях криволинейного профиля 3-ДВ метод динамического пересчета может эффективно использоваться только для обработки материалов ОГТ и ГСЗ.

Четвертая глава посвящена развитию программно-алгоритмической составляющей метода динамического пересчета при переходе от временных к скоростным разрезам.

1. Контроль изменения областей прослеживания преломленных волн вдоль профиля 3-ДВ по сейсмограммам ОПВ. На начальном этапе пересчетом волнового поля в сейсмограммы ОПВ $i=const$ строим систему динамических годографов преломленных волн и по нагоняющим годографам определяем координаты смены преломленных волн в первых вступлениях – “точки излома” годографов. Пример определения координат смены преломленных волн по динамическому годографу $i=const$ представлен на рисунке 4 а. В первых вступлениях на интервале расстояний 0-1.2 км от источника прослеживается продольная волна P_1 с кажущейся скоростью 3.8 км/с. В интервале 1.2-5 км в первых вступлениях прослеживается продольная преломленная волна P_2 с кажущейся скоростью 4.9 км/с. На расстояниях от источника от 5 км и до конца расстановки сейсмоприемников, в первых вступлениях прослеживается опорная высокоскоростная волна P_o с кажущейся скоростью 6.0 км/с. Выполним определение области прослеживания опорной волны P_o : вдоль профиля выполняется автоматическая проверка значений $\Delta x/\Delta t$ в выбранных окнах $\Delta L_1=[5 \text{ км}; 7 \text{ км}]$ и $\Delta L_2=[7 \text{ км}; 9 \text{ км}]$. Окно ΔL_1 ограничено синими горизонтальными пунктирными линиями на рисунках 4 а-в. Синяя линия на рисунке 4 г отображает график вычисленных значений $\Delta x/\Delta t$ в этом окне. Окно ΔL_2 ограничено красными наклонными пунктирными линиями на рисунках 4 а-в. Красной линией на рисунке 4 г показан график вычисленных значений в окне ΔL_2 . Если разность вычисленных значений $\Delta x/\Delta t$ в окнах ΔL_1 и ΔL_2 не превышает 0.3 км/с (как, например, показано стрелками “а), б”) на рисунке 4 г), то считаем, что значения $\Delta x/\Delta t$ совпадают со значением кажущейся скорости волны. Соответственно, область прослеживания преломленной волны P_o в первых вступлениях на интервале профиля не изменяется. В случае, если вдоль профиля фиксируется устойчивая разность значений $\Delta x/\Delta t$ в окнах $\Delta L_1=[5 \text{ км}; 7 \text{ км}]$ и $\Delta L_2=[7 \text{ км}; 9 \text{ км}]$, превышающая 0.4 км/с (как показано стрелкой “в”) на

рисунке 4.3 г), то это означает, что в результате вычисления $\Delta x/\Delta t$ в окне $\Delta L_1 = [5 \text{ км}; 7 \text{ км}]$ вносит вклад кажущаяся скорость волны P_2 (см. рисунок 4 в). Таким образом зафиксировано изменение областей прослеживания преломленных волн в первых вступлениях на интервале профиля от ПК 300 км до ПК 450 км. Устойчивая вдоль профиля разность значений $\Delta x/\Delta t$, вычисленных в окнах ΔL_1 и ΔL_2 , превышающая 0.4 км/с, является критерием изменения области прослеживания преломленной волны.

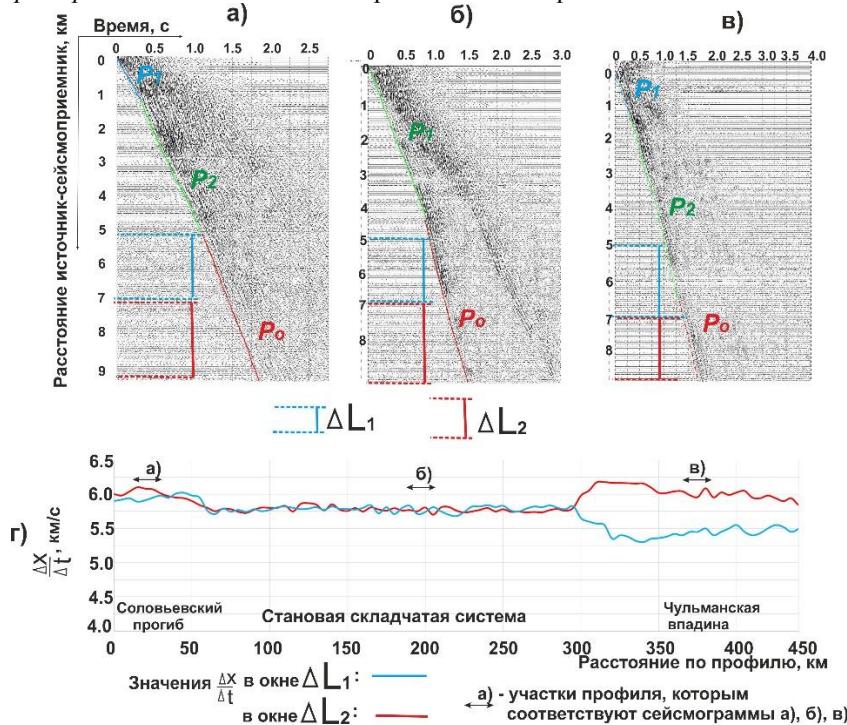


Рисунок 4 – Пример автоматизированного контроля областей прослеживания опорной продольной преломленной волны P_o вдоль Южного участка профиля 3-ДВ.

При обнаружении устойчивой разности значений $\Delta x/\Delta t$ вдоль профиля вновь корректируем область прослеживания волн в первых вступлениях по пересчитанным динамическим годографам $i=const$, которые отображают волновое поле в этой части профиля (см. рисунок 4 а), и далее аналогично отслеживаем изменение значений $\Delta x/\Delta t$ в новых окнах ΔL_1 и ΔL_2 вдоль профиля.

2. *Динамический пересчет волнового поля во временные разрезы* $L=const$ *вдоль профиля 3-ДВ.* Определив области прослеживания преломленных волн вдоль профиля, выполняем динамический пересчет трасс внутри области прослеживания каждой волны во временные разрезы $L_i = const$ с использованием области полезной информации (см. рисунок 2). По временным разрезам $L_1=const$ и $L_2=const$, построенных пересчетом трасс, лежащих в области прослеживания одной и той же преломленной волны, возможно вычислять значения граничной скорости этой волны. Два временных разреза $L_1=const$ и $L_2=2L_1$ дают возможность вычислять вдоль профиля значения t_0 этой же волны. Рисунок 5 демонстрирует фрагмент временного разреза по Центральному участку профиля 3-ДВ и пример результирующей сейсмограммы ОПВ. Цветными линиями показаны оси синфазности выделенных преломленных и кратных преломленных волн.

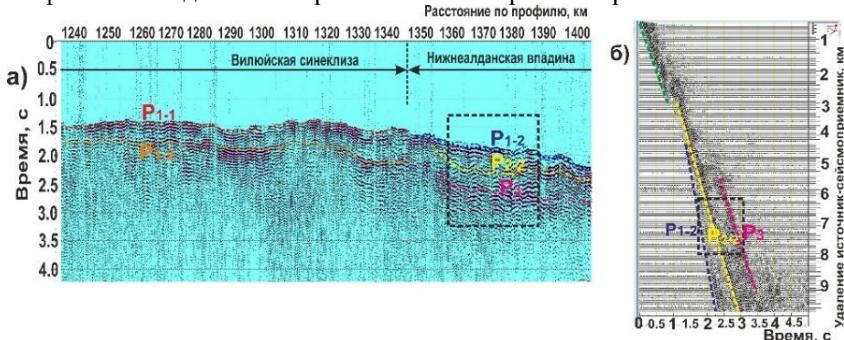


Рисунок 5 - Результаты динамического пересчета на Центральном участке профиля 3-ДВ: а) временной разрез ($L=7$ км); б) сейсмограмма ОПВ (динамический годограф $i=const$).

Для верификации динамического пересчета вычисляются спектры когерентности и оцениваются погрешности значений АЧХ фильтров пересчета, с учетом кратности системы наблюдения. Чем ближе значения на спектрах когерентности к 1, тем большая доля в общей энергии волнового поля принадлежит головным волнам [Восстановление ..., 2004]. Для выделенных сигналов головных волн вдоль профиля 3-ДВ на спектрах зафиксированы значения 0.7-0.9 в диапазонах частот от 20 до 50 Гц. Более низкие значения (0.3-0.4 и ниже) на спектрах могут быть обусловлены, например, изменением области прослеживания волн, отсутствием головных волн или низкими значениями сигнал/шум в исходных данных.

3. *Контроль рефракции волн по изменению частотных спектров сигналов.* Влияние эффекта рефракции волн при динамическом пересчете эквивалентно низкочастотной фильтрации сигналов [Сергеев, 1988]. При

динамическом пересчете сигналов преломленных волн, распространяющихся в толщах с наличием рефракции, понижаются амплитуды высокочастотных компонент Фурье-спектров. Чем интенсивнее рефракция волн, тем ниже значения “верхних” частот в результирующих спектрах. Границные частоты спектров определяются по доле 0.7 от максимальной амплитуды. На рисунке 6 серым цветом показано изменение частотных спектров первичных трасс вдоль Северо-Западного участка профиля, а светло-красной заливкой выделено изменение вдоль профиля частотных спектров трасс, составляющих результирующий временной разрез $L=const$. Нижние граничные частоты сигналов на временном разрезе составляют ~ 12 Гц. Полученные в интервалах профиля 50-320 км и 450-600 км спектры исходных сигналов продольных волн шире, чем спектры результирующих сигналов на 8-10 Гц в области верхних частот. В спектрах трасс на интервалах временного разреза 0-50 км, 320-450 км и 650-700 км значения “верхних” граничных частот исходных и результирующих трасс близки, максимальные различия не превышают 1-2 Гц.

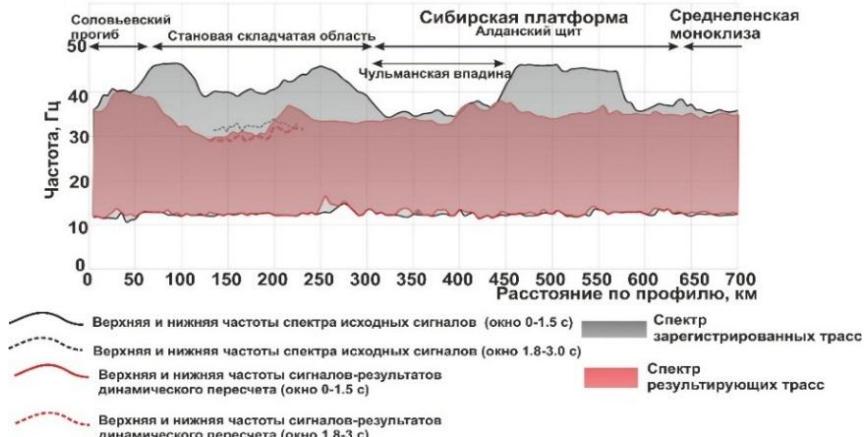


Рисунок 6 – Частотный состав первичных сигналов и сигналов-результатов динамического пересчета на Южном участке профиля З-ДВ.

Далее вычисляем коэффициенты рефракции волн (γ). Для этого используется формула [Старобинец А.Е. и Старобинец М.Е., 1988]:

$$\gamma = 2 \cdot \sqrt{2 \cdot b \cdot V / (L \cdot (x_1 + x_2 - L - 2 \cdot X_u))}, \quad (5)$$

V – скорость в покрывающей толще, b – угловой коэффициент линейного тренда графика разности нагоняющих годографов в пределах изучаемого участка, L – расстояние между пунктами возбуждения, x_1 и x_2 – границы

рассматриваемого участка графика разности. X_n - координата начальной точки преломленной волны. Рисунок 7 иллюстрирует примеры графиков разности нагоняющих годографов преломленных волн в тектонических блоках, пересекаемых Северо-Западным участком профиля 3-ДВ.



Рисунок 7 – Примеры графиков разности нагоняющих годографов на Северо-Западном участке профиля 3-ДВ.

По графикам, показанным на рисунках 7 а и б, не зафиксировано монотонного понижения значений разности нагоняющих годографов преломленных волн P_2 и P_3 с увеличением расстояния от источника. Результаты вычислений с использованием (5) свидетельствуют о незначительной рефракции волн P_2 и P_3 в Нижнеалданской впадине: коэффициенты рефракции составляют $\sim 0.03 \text{ км}^{-1}$ и $\sim 0.02 \text{ км}^{-1}$, соответственно. На рисунке 7 в изображен график функции разности годографов, зафиксированных в пределах Сетте-Дабанской зоны. Вычисленное значение коэффициента рефракции под преломляющей границей составляет: $\gamma \sim 0.09 \text{ км}^{-1}$.

В пятой главе диссертации представлены скоростные модели верхней части земной коры на участках профиля 3-ДВ и их геологическая интерпретация. Ниже продемонстрированы временной разрез (рисунок 8 а) и скоростная модель (рисунок 8 б) по Северо-Западному участку профиля [Еманов, Полянский, Сальников, 2021].

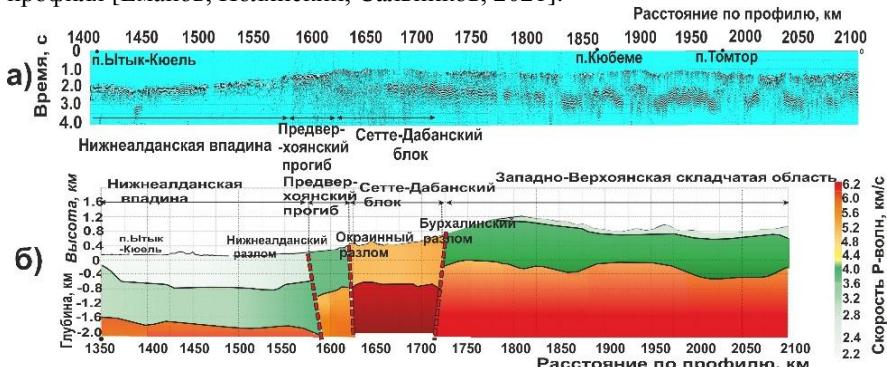


Рисунок 8 – Временной разрез (а) и скоростная модель (б) верхней части земной коры по Северо-Западному участку профиля 3-ДВ.

Представленное скоростное строение верхней коры в интервале профиля 1400–1600 км (пересекающем часть Сибирской платформы) – два слоя и подстилающее полупространство. Первый слой со скоростью продольных волн $2.2\div2.6$ км/с залегает на глубинах до -0.8 км от уровня моря. Зафиксированные значения скорости свойственны менее плотным осадочным породам молодого возраста, которыми сложена Нижнеалданская впадина [Черкасов, Сальников, Гошко, 2013], поэтому первая преломляющая граница трактуется как основание Нижнеалданской впадины. В промежуточном слое скорость P -волн составляет $3.8\div4.2$ км/с при коэффициенте рефракции $\gamma\sim0.03$ км $^{-1}$. Подошва второго слоя прослежена на глубине ~2 км от уровня моря, граничная скорость продольных волн на ней ~5.9 км/с, присутствует небольшая рефракция $\gamma\sim0.02$ км $^{-1}$. Эта граница, прослеженная и по данным отраженных волн в [Создание ..., 2011], интерпретируется как кровля фундамента Сибирской платформы под Нижнеалданской впадиной.

В верхней коре в области Предверхоянского прогиба при скорости продольных волн в покрывающей толще 4.0 км/с прослежена одна преломляющая граница на глубине ~1.0 км, со значением граничной скорости продольных волн ~5.5 км/с. Вычисленные значения скорости в покрывающей толще свойственны осадочным породам, граничная скорость продольных волн также недостаточно велика для кристаллических пород фундамента. Поэтому преломляющая граница является литологическим разделом в осадочном чехле. Из публикаций [Пущаровский, 1959] и [Суворов и Мельник, 2019] известно, что общая мощность осадочного чехла в зоне Предверхоянского краевого прогиба превышает 8 км. То есть кровля платформенного фундамента залегает на глубинах значительно больших, чем под Нижнеалданской впадиной. Такие глубины недоступны для изучения преломленными волнами с длиной гидографов 10 км, максимальной для системы МОВ-ОГТ. Повышенные значения глубины залегания фундамента под Предверхоянским прогибом также известно из отчета по интерпретации материалов отраженных волн [Создание ..., 2011]. Таким образом, подтверждается мнение ряда исследователей [Имаева и др., 2006; Старосельцев, 2015; Третьяков, Прокопьев, 2015] о надвиговой природе зоны сочленения Сибирской платформы и Верхояно-Колымской складчатой области.

Сетте-Дабанский блок характеризуется повышенными значениями скоростей P - и S -волн в верхней коре [Полянский, Сальников, Еманов, 2014], что также зафиксировано другими исследователями [Соловьев и др., 2014; Суворов, Мельник, Сальников, 2014]. На построенном скоростном разрезе на глубине ~1.0 км фиксируется преломляющая граница со скачком скорости продольных волн от 4.8 км/с до 6.4 км/с и сильной

рефракцией волн ($\gamma \sim 0.09$ км $^{-1}$). На геологическом разрезе земной коры Сетте-Дабанского блока [Прокопьев, 1998], построенном вдоль параллельной профилю 3-ДВ линии, на ~150 км южнее его (см. рисунок 1), на глубине ~1.2 км фиксируется стратиграфическое несогласие между карбонатными осадочными и толщей вулканогенных пород с интрузиями ультраосновных пород. Зафиксированные на нашем разрезе (см. рисунок 8 б) выше и ниже преломляющей границы значения скорости P -волн дают возможность интерпретировать прослеженную границу в створе профиля 3-ДВ как поверхность данного стратиграфического несогласия.

Вдоль Северо-Восточного участка профиля 3-ДВ построен скоростной разрез (рисунок 9 а) и оценено изменение значений отношения скоростей P - и S - волн (рисунок 9 б) [Полянский, Еманов, Сальников, 2021].

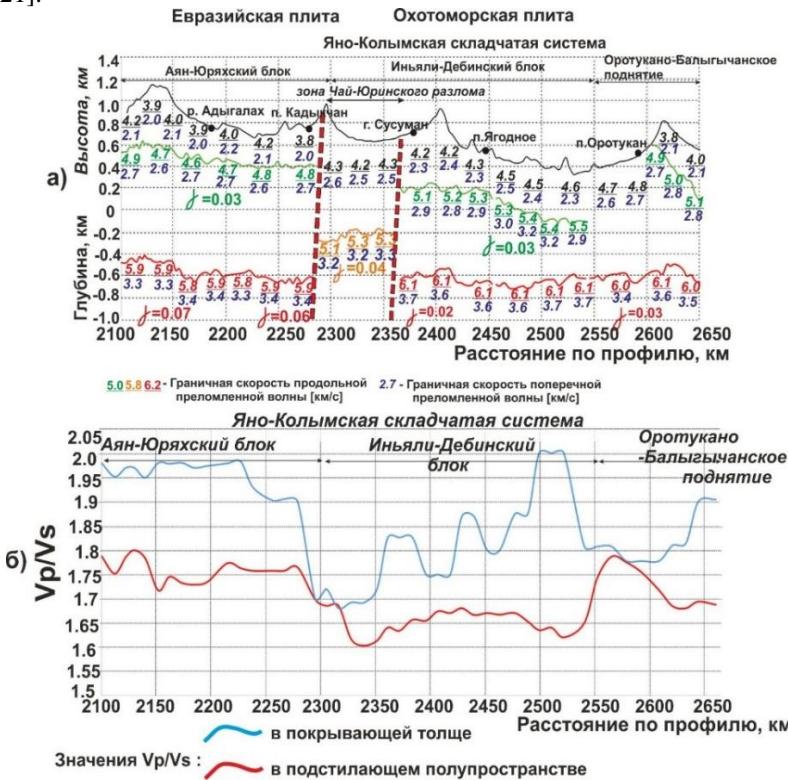


Рисунок 9 – Скоростная модель верхней части коры (а) и изменение значений Vp/Vs вдоль Северо-Восточного участка профиля 3-ДВ (б).

На интервале построенного разреза 2100-2270 км в верхней части земной коры Аян-Юряхского блока выделено два слоя с подстилающим их полупространством. В верхнем слое зафиксированы $V_p \sim 3.8\text{-}4.2$ км/с, $V_s \sim 2.0\text{-}2.1$ км/с. В слое под первой преломляющей границей скорость продольных волн составляет 4.6-4.8 км/с, $V_s \sim 2.6\text{-}2.7$ км/с. Значения скоростей и повышенные значения отношения V_p/V_s , изменяющиеся в диапазоне 1.90-2.0, свойственны породам осадочного чехла [Кашубин и др., 2011]. Вторая преломляющая граница характеризуется достаточно высокими для осадочных пород значениями граничной скорости продольных волн и поперечных волн (5.8-5.9 км/с и 3.3-3.4 км/с). Под этой преломляющей границей зафиксирована рефракция волн ($\gamma \sim 0.06$ км⁻¹).

На отрезке 2270 км - 2350 км Северо-Восточный участок 3-ДВ простирается в зоне Чай-Юринского разлома, разделяющего Иньяли-Дебинский и Аян-Юряхский блоки [Чехов, 1976]. При этом отрезок профиля параллелен плоскости разлома. Верхняя часть земной коры в плоскости разреза между отметками профиля 2270-2350 км представлена двумя толщами, граница между которыми расположена на глубине минус 0.2 км от уровня моря. Скорость P -волн в верхней толще меняется в пределах 4.2-4.3 км/с, скорость S -волн – в пределах 2.5-2.6 км/с. В нижней толще зафиксированы скорости продольных волн от 5.1 до 5.3 км/с и скорости поперечных волн от 3.2 до 3.3 км/с. Приразломная зона характеризуется пониженными значениями отношения скоростей V_p/V_s : в верхней толще они составляют 1.68-1.72 (коэффициент Пуассона составляет $\sim 0.22\text{-}0.24$), а под преломляющей границей - изменяются от 1.61 до 1.65 (значения коэффициента Пуассона составляют $\sim 0.19\text{-}0.21$). Вычисленные значения отношения скоростей продольных и поперечных волн и в верхней и нижней толщах, вероятно, связаны с раздробленностью пород в зоне Чай-Юринского разлома.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования доказана возможность применения метода динамического пересчета преломленных волн для обработки данных систем МОВ-ОГТ и ГСЗ на опорных профилях, развита программно-алгоритмическая составляющая метода динамического пересчета. С использованием разработанных алгоритмов при обработке данных преломленных волн системы МОВ-ОГТ получена информация о скоростном строении верхней части земной коры вдоль профиля 3-ДВ.

Полученная дифференцированием функции разности нагоняющих гидографов преломленных волн формула вычисления амплитудно-частотных характеристик фильтров пересчета с учетом параметров

кривизны профиля является важным результатом исследования. Значения АЧХ фильтров, полученные с использованием этой формулы, показали, что кривизна профиля воздействует на результирующие сигналы преломленных волн при динамическом пересчете как низкочастотный фильтр. В условиях модели с линейным возрастанием скорости волн в подстилающем полупространстве рассчитаны АЧХ низкочастотных фильтров, обусловленных влиянием рефракции волн. Вычисленные значения АЧХ показывают, что при динамическом пересчете данных, регистрируемых системами наблюдений ОГТ и ГСЗ, уменьшение амплитуды результирующих сигналов в условиях профиля 3-ДВ незначительно.

Создан подход к цифровой обработке данных преломленных волн, зарегистрированных системой наблюдения ОГТ, основанный на методе динамического пересчета: 1) определение областей прослеживания преломленных волн по сейсмограммам ОПВ $i=const$ и автоматический контроль изменения областей прослеживания волн вдоль профиля по значениям $\Delta x/\Delta t$, вычисляемым в окнах ΔL_1 и ΔL_2 ; 2) динамический пересчет трасс, входящих в области прослеживания, во временные разрезы $L=const$; 3) вычисление граничной скорости преломленных волн и значений t_0 по временным разрезам $L=const$, автоматический контроль рефракции волн вдоль профиля по частотным спектрам трасс временных разрезов $L=const$; 4) переход от временных разрезов к скоростным на основе способа t_0 .

Построенные временные и скоростные разрезы отобразили динамические и кинематические характеристики волнового поля, соответствующего верхней части земной коры осадочных бассейнов и складчатых областей на профиле 3-ДВ. Установлено, что преломленным волнам, распространяющимся в осадочном чехле, свойственна отсутствующая или незначительная рефракция, а для преломленных волн в пределах складчатых областей, как правило, характерна более сильная рефракция. На участках профиля 3-ДВ прослежены преломляющие горизонты, интерпретируемые как границы в осадочном чехле и кровля фундамента Сибирской платформы; в верхней коре Предверхоянского прогиба зафиксирована преломляющая граница раздела пород в осадочном чехле. Фундамент в области Предверхоянского прогиба находится на глубинах, не доступных системе наблюдений МОВ-ОГТ. В верхней части коры в Сетте-Дабанской зоне зафиксирована преломляющая граница, интерпретируемая как несогласие между толщиной карбонатных и вулканогенно-осадочных пород с интрузиями пород основного состава. Таким образом, подтверждается мнение ряда исследователей [Имаева и др., 2006; Старосельцев, 2015; Третьяков и Прокопьев, 2015] о надвиговой

структуре зоны сочленения Сибирской платформы и Верхояно-Колымской складчатой области.

Вдоль Северо-Восточного участка профиля 3-ДВ методом динамического пересчета выполнена селекция сигналов поперечных преломленных волн. Построены графики, отображающие изменение значений отношения скоростей P - и S -волн в верхней части коры. Полученная информация о значениях V_p/V_s важна для металлогении Магаданской области и республики Якутия.

Без сомнений, следует продолжить развитие программно-алгоритмической составляющей методов цифровой обработки данных преломленных волн. Актуальной задачей является определение динамических характеристик волн, преломленных на глубинных границах раздела в земной коре. Несомненно, необходима разработка новых алгоритмов, позволяющих эффективно применять метод динамического пересчета для обработки материалов глубинного сейсмического зондирования. Использование полученной важной информации о частотных спектрах сигналов волн, преломленных на границе Мохоровичича, и о закономерностях рефракции волн в глубинных толщах земной коры позволит повысить разрешающую способность метода ГСЗ при локализации глубинных разломов и границ литосферных плит.

Не менее актуальная задача в перспективе исследования - разработка алгоритмов миграции на основе метода динамического пересчета преломленных волн. В настоящий момент полностью автоматизировано построение временных разрезов и только частично – переход от них к скоростным. Некоторые сейсмограммы (линия начальных точек и линия сопряженных точек головной волны), по мнению С.В. Гольдина [Гольдин, 1991] могут быть пересчитаны в глубинные разрезы. Программная реализация таких алгоритмов даст возможность оперативно получать сейсмические модели земной коры вдоль опорных профилей с высокой степенью достоверности.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах из Перечня ВАК

1. **Полянский П.О.** Временные разрезы головных волн верхней части земной коры на опорном профиле 3-ДВ (Северо-Восточный участок) / **Полянский П.О.**, Сальников А.С., Еманов А.Ф., Жабин В.В. // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. - 2016. - №2. - С. 86-95.
2. **Полянский П.О.** Временные разрезы головных волн верхней части земной коры на опорном профиле 3-ДВ (Северо-Западный участок) / **Полянский П.О.**, Сальников А.С., Еманов А.Ф., Жабин В.В. // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. - 2017. - №2. - С. 112-122.

3. **Полянский П.О.** Динамический пересчет головных волн на Центральном участке опорного профиля 3-ДВ: особенности методики и интерпретация временных разрезов / **Полянский П.О.**, Еманов А.Ф., Сальников А.С., Жабин В.В. // Геофизические исследования. – 2018. - т. 19. - №2. - С. 5-33.
4. **Полянский П.О.** Преломляющие границы в верхней части земной коры на Южном участке опорного геофизического профиля 3-ДВ / **Полянский П.О.**, Еманов А.Ф., Сальников А.С. // Геофизика. – 2019. - №3. - С. 80-89.
5. Еманов А.Ф. Сейсмическая модель верхней части земной коры Юго-Восточной границы Сибирской платформы / Еманов А.Ф., **Полянский П.О.**, Сальников А.С. // Физика Земли. – 2021. -№3. – С. 130-146.

Программы для ЭВМ

1. **Полянский П.О.** Программный комплекс для цифровой обработки данных сейсморазведки с многократными перекрытиями методом динамического пересчета головных волн “Dynamond v1.0” / **Полянский П.О.**, Дураченко А.В., Еманов А.Ф. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019617268.

Статьи в журналах и сборниках, материалы конференций

1. **Полянский П.О.** Применение алгоритма динамического пересчета головных волн к обработке данных ОГТ (Северо-Западный участок опорного профиля 3-ДВ) / **Полянский П.О.**, Сальников А.С, Еманов А.Ф. // Геофизические методы исследования земной коры: Материалы Всероссийской конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика Н.Н. Пузырева. (Новосибирск, 8–13 декабря 2014 г.). – Новосибирск: Изд-во ИНГ СО РАН, 2014. - С. 238-244.
2. **Полянский П.О.** Применение динамического пересчета головных волн на Центральном участке профиля 3-ДВ (респ. Якутия) для изучения преломляющих границ верхней части земной коры / **Полянский П.О.**, Сальников А.С., Еманов А.Ф. // Материалы XII Международного научного конгресса и выставки «Интерэкспо Гео-Сибирь-2016». – Новосибирск: СГУГиТ, 2016. - Т. 2. - №1. - С. 210-215.
3. **Полянский П.О.** Использование метода динамического пересчета для изучения преломляющих границ в верхней части земной коры на опорном профиле 3-ДВ (Северо-Восточный участок, Магаданская обл.) / **Полянский П.О.**, Еманов А.Ф., Сальников А.С. // Сборник тезисов научно-практической конференции “Сейсмические технологии 2016”. (Москва, 18-20 апреля 2016 г.). - М: Изд-во ООО “Феория”, 2016. - С. 154-158.
4. **Полянский П.О.** Временные разрезы головных волн в области сочленения Сибирской платформы и Верхояно-Колымской складчатой области / **Полянский П.О.**, Еманов А.Ф., Сальников А.С. // сб. материалов научно-практической конференции “ГеоБайкал-2016. Расширяя горизонты” (Иркутск, 20-26 августа 2016 г.). EAGE publications BV, 2016. - С. SS03. - DOI: 10.3997/2214-4609.201601734.
5. **Полянский П.О.** Особенности методики динамического пересчета головных волн на опорном профиле 3-ДВ/ **Полянский П.О.**, Еманов А.Ф., Сальников

- А.С. // Материалы XIII Международного научного конгресса и выставки «Интерэкспо Гео-Сибирь-2017». – Новосибирск: СГУГиТ, 2017. - Т. 2. - №4. - С. 28-33.
6. **Полянский П.О.** Изучение характеристик преломляющих горизонтов верхней части земной коры на Южном участке профиля 3-ДВ / **Полянский П.О.**, Еманов А.Ф., Сальников А.С. // Материалы XV Международного научного конгресса и выставки «Интерэкспо Гео-Сибирь-2018». - Новосибирск: СГУГиТ, 2018. - Т. 2. - №4. - С. 17-25.
7. **Полянский П.О.** Преломляющие границы в верхней части земной коры на опорном профиле 1-СБ (Забайкальский участок) / **Полянский П.О.**, Еманов А.Ф., Сальников А.С. // Материалы XVI Международного научного конгресса и выставки “Интерэкспо Гео-Сибирь-2019”. – Новосибирск: СГУГиТ, 2019. – Т. 2. - №2. – С.11-18.
8. **Полянский П.О.** Изучение строения земной коры с использованием динамического пересчета преломленных волн во временные разрезы и динамические годографы / **Полянский П.О.**, Еманов А.Ф., Сальников А.С. // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XV Международной сейсмологической школы (г. Новосибирск, 6-10 сентября 2021 г.). - Обнинск, ФИЦ ЕГС РАН, 2021. - С. 70.