ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ИНСТИТУТ НЕФТЕГАЗОВОЙ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ ИМ. А.А. ТРОФИМУКА СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

ЧЕРНЫШОВ ГЛЕБ СТАНИСЛАВОВИЧ

ПОСТРОЕНИЕ СЕЙСМОТОМОГРАФИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ РАЗРЕЗА ПО ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКИМ ДАННЫМ С ПОДАВЛЕНИЕМ КОРРЕЛЯЦИОННОГО ШУМА

1.6.9 – Геофизика

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

Дучков Антон Альбертович, кандидат физико-математических наук

НОВОСИБИРСК

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ
Глава 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ РЕШЕНИЙ И РАЗРАБОТОК13
1.1 Анализ известных современных способов повышения качества вибрационных данных
1.2 Анализ известных современных алгоритмов построения скоростной модели ВЧР21
Глава 2. МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ27
2.1 Стандартный подход к обработке вибросейсмических данных
2.2 Расчет низкочастотных свип-сигналов
2.3. Анализ возможности генерации низкочастотных свип-сигналов по данным опытно- методических работ
2.4. Обработка виброграмм
Глава 3. АЛГОРИТМ ЛУЧЕВОЙ ТОМОГРАФИИ С ПОДБОРОМ ОПТИМАЛЬНОЙ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ АНОМАЛИЙ62
3.1. Описание алгоритма
3.2. Тестирование и выбор параметризации модели
3.3. Апробация модифицированного алгоритма на реальных данных
ЗАКЛЮЧЕНИЕ102
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ104
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ105
СПИСОК ИЛЛЮСТРАТИВНОГО МАТЕРИАЛА116

введение

Объект исследования - методики получения и обработки вибросейсмических данных для построения скоростной модели ВЧР с использованием метода лучевой сейсмической томографии.

Актуальность исследований

Сейсмический метод направлен на изучение среды для построения скоростных моделей – распределение скоростей сейсмических волн. Основным источником развития метода является сейсморазведка для поиска и разведки месторождений углеводородов.

В последние десятилетия наиболее активно развивается метод вибросейсмики. Вибрационные источники сейсмических волн имеют ряд преимуществ по сравнению со взрывными. Они позволяют значительно повысить производительность работ, могут использоваться в сложных поверхностных условиях, имеют меньше ограничений по безопасности и экологичности проведения работ. Однако качество данных, полученных с помощью вибрационных источников, часто ниже, чем у взрывных. Это связано с техническими трудностями генерации низких и высоких частот, а также с нелинейными искажениями. Одним из решений понижения начальной частоты свип сигнала является генерация нелинейных свип-сигналов.

Наземные сейсморазведочные работы зачастую проводятся в регионах со сложной структурой верхней части разреза (ВЧР). Осложняющими факторами как для малоглубинных, так и для разведочных задач являются перепады высот рельефа, наличие неоднородной зоны малых скоростей (ЗМС) и высокоскоростных слоев многолетнемерзлых пород в северных районах.

В первых работах по изучению ВЧР сейсмическими методами по временам прихода сейсмических волн строились слоистые скоростные модели методами: прямого лучевого моделирования, полей времен, t0` в различных вариациях. Кроме времен первых вступлений, проводилась корреляция последующих волн, что давало дополнительную информацию о среде. Однако,

требованию автоматизации обработки больших объемов данных лучше всего удовлетворяет метод лучевой томографии, результатом которого являются модели с гладкими вариациями скоростей. Входными данными для него служат годографы времен первых вступлений сейсмических волн, качество работы автоматических алгоритмов сильно зависит от соотношения сигнал/шум на сейсмограммах. Особенно актуальна эта проблема для данных вибрационной сейсморазведки из-за наличия дополнительных видов шума (корреляционные и гармонические шумы). Понижения уровня шума можно добиться применением специальных алгоритмов на этапе обработки данных, при этом в публикациях и методических рекомендациях отсутствует достоверная оценка эффективности алгоритмов обработки исходных вибрационных данных.

Различные реализации самого метода лучевой томографии отличаются методами решения прямой задачи для расчета времен пробега сейсмических построению сетки задания скоростной волн. подходом к модели, параметризацией модели, подходом к регуляризации задачи, алгоритмом решения системы линейных уравнений. В существующих реализациях томографии особенности параметризации алгоритма модели получили наименьшее внимание, реализуются только два варианта: через скорость или медленность.

Основными этапами (особенностями) построения скоростной модели ВЧР по вибросейсмическим данным являются:

1) Повышение качества вибросейсмических данных путем: а) расширения частотного диапазона генерируемого сигнала, включая расширение в сторону низких частот, б) обработки виброграмм при получении коррелограмм направленную на понижение уровня корреляционных помех в области прослеживания волн первых вступлений.

2) Снятие времен первых вступлений на коррелограммах.

3) Построение скоростной модели ВЧР методом томографической инверсии – слоистые или сеточные модели.

Таким образом, в настоящее время существует необходимость развития как подходов к получению и обработке вибрационных данных, так и алгоритмической составляющей метода лучевой сейсмической томографии.

Цель исследования – повысить точность и разрешающую способность построения скоростной модели среды верхней части разреза (ВЧР) по временам первых вступлений для вибросейсмических данных за счет подавления корреляционного шума и подбора параметризации модели метода лучевой томографии.

Научно-технические подзадачи –

1. Разработать методику получения и обработки вибросейсмических данных с подавлением корреляционного шума

2. Модифицировать алгоритм лучевой томографии с возможностью подбора оптимальной параметризации модели при построения скоростной модели ВЧР.

Этапы исследования

1) Повышение качества вибросейсмических данных:

• Аналитический обзор известных из публикаций алгоритмов расчета низкочастотных свип-сигналов и обработки вибросейсмических данных.

• Разработка и программная реализация алгоритма генерации низкочастотных свип-сигналов с компенсацией занижения усилия прижима вибрационной установки в области низких частот.

• Апробация алгоритма расчета свип-сигнала при проведении опытно-методических работ на месторождении группой вибрационных установок.

• Разработка и тестирование оптимальной методики обработки исходных вибросейсмических данных для уменьшения уровня корреляционных шумов с использованием сигнала с плит вибратора – усилие на грунт (Ground Force, GF).

2) Модификация алгоритма томографической инверсии:

• Разработка и реализация возможности выбора параметризации аномалий начальной скоростной модели.

• Разработка рекомендаций по выбору оптимальной параметризации.

• Апробация модифицированного алгоритма томографической инверсии с подбором параметризации аномалий скоростной модели на синтетических и реальных данных сейсморазведки.

Теория, методы исследования, фактический материал, программное обеспечение

Способ расчета низкочастотных свип-сигналов основывается на теории генерации низких частот гидравлическими вибрационными установками. Независимо от модели установки вид функции максимально-возможного усилия соответствует квадрату частоты на низких частотах. Для расчета абсолютных значений усилия необходимы параметры массы и максимального хода реакционной плиты конкретной модели установки.

Теория обработки исходных вибрационных данных основывается на фильтрации сейсмических данных, преобразовании Фурье, построении прямых и обратных фильтров.

Теоретические основы алгоритма лучевой сейсмической томографии:

• Лучевое приближение теории распространение сейсмических волн. Расчет траекторий лучей выполняется с помощью численного решения уравнения эйконала с последующим применением алгоритма обратного трассирования.

• Регуляризация функционала выполняется методом регуляризации Тихонова с использованием нулевой и первой нормы производной неизвестных параметров модели.

• Для решения системы линейных уравнений используется разновидность метода наименьших квадратов - метод LSQR.

Для апробации способа генерации НЧ свип-синалов используются данные разведочной сейсморазведки, полученные в рамках опытнометодических работ в южной части Волго-Уральского региона.

Для апробации модифицированного алгоритма лучевой сейсмической томографии используются данные инженерной сейсморазведки, полученные полевым отрядом лаборатории динамических проблем сейсмики ИНГГ СО РАН.

Для анализа возможности генерации низкочастотных свип-сигналов вибрационными установками используется программное обеспечение: CheckSweep (Sercel, Франция), TestIf (Verif-I, Великобритания), широко распространенное в сервисных компаниях, выполняющих сейсморазведочные работы.

Для обработки сейсмических данных используется современное программное обеспечение ведущих мировых производителей для геофизической отрасли – Geocluster, Geovation (CGG, Франция), SeisSpace ProMAX (Halliburton, США), TomoPlus (Geotomo, США).

Защищаемые научные результаты:

1) Методика получения и обработки вибросейсмических данных для повышения качества прослеживания времен первых вступлений:

- i.i. Расчет низкочастотных свип-сигналов с компенсацией заниженного усилия на грунт вибрационного источника на низких частотах. Скорость развертки частоты сигнала во времени делится на две части: нелинейную - в области от минимальной частоты развертки до частоты выхода на максимальное усилие, линейную - от частоты выхода на максимальное усилие до максимальной частоты свип-сигнала.
- і.іі. Подбор оптимальных значений начальной частоты развертки и частоты выхода на максимальное усилие свип-сигнала в зависимости от модели вибрационного источника. Частота выхода на максимальное усилие должна быть минимально возможной, ограничение снизу обосновывается возможностями используемой модели источника вибрационных колебаний.

i.iii. Расчет коррелограмм с применением к виброграммам детерминистической деконволюции по взвешенному сигналу акселерометров с плит вибрационной установки (GF)

2) Модификация алгоритма томографической инверсии с оптимальной параметризацией аномалий начальной скоростной модели среды для определения скоростного строения ВЧР. Выбор оптимальной параметризации основывается на глубинности целевых аномалий в среде.

Личное участие соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации.

Чернышовым Г.С. лично разработана методика повышения качества вибросейсмических данных и модифицирован алгоритм томографической инверсии.

Разработаны рекомендации по выбору оптимальной частоты выхода на максимальное усилие вибрационной установки при генерации НЧ свипсигналов. Выбор частоты согласно рекомендациям, повышает качество и сокращает время генерации НЧ свип-сигнала.

Программно-реализованы и применены рассматриваемые в работе алгоритмы обработки исходных вибрационных данных. Выполнено тестирование разработанной методики для подтверждения корректности работы, а также выводов о повышении качества вибросейсмических данных и детальности скоростных моделей.

Автор лично принимал участие в полевых работах и получении данных малоглубинной сейсмики, проводил обработку и интерпретацию реальных данных для апробации элементов разработанной методики при изучении механических свойств пород верхней части разреза.

Автор лично разработал программу тестирования виброисточников на предмет возможности генерации низких частот и анализировал реальные данные опытных методических сейсморазведочных работ с разными моделями виброисточников. Разработана рекомендация выбора частоты выхода на максимальное усилие источника - определяется исходя из указанных в паспорте

технических характеристик или путем генерации монохроматических сигналов. Критериями возможности генерации низких частот служит значение нелинейных искажений - уменьшение при возрастании усилия вибратора на конкретной частоте, синфазность генерации низких частот всеми вибратора в группе.

Научная новизна.

Выведены явные формулы для задания развертки свип-сигнала в области низких частот для компенсации занижения усилия прижима вибрационной установки в этой области. Скорость развертки частоты в области низких частот (нелинейная часть) в квадрат занижения мощности меньше чем у линейного участка. С учетом этой особенности рассчитывается функция скорости развертки частоты свип-сигнала. Программную реализовал алгоритм генерации низкочастотного свип-сигнала для использования при проведении полевых сейсморазведочных работ.

Предложена обработки оптимальная методика для подавления корреляционных шумов в первых вступлениях, включающая деконволюцию виброграмм с сигналом Ground Force. Деконволюция применяется в частотной области для оптимизации времени расчета. Сигнал с плит установки усредняется для группы источников. Уровень шума для деконволюции подбирается в зависимости от уровня шума данных, обычно в диапазоне 1-5%. После применения деконволюции необходимо применить полосовую фильтрацию в той же полосе частот, что и генерируемый свип, для подавления шума вне целевой полосы частот: гармонический сигнал, случайный шум, сигнал сторонних источников.

Модифицирован алгоритм томографической инверсии - добавлена возможностью выбора параметризации скоростной модели среды через умножение томографической матрицы на весовую, состоящую из значений скорости начальной скоростной модели в заданной пользователем степени (от -2 до 0). Показано на серии тестов на синтетических и реальных данных, что

оптимальная параметризация среды в большинстве случаев не будет соответствовать стандартному виду (скорость, медленность).

Теоретическая и практическая значимость.

Разработанная методика позволяет повысить качество вибросейсмических данных, в частности повысить устойчивость снятия времен первых вступлений на вибросейсмических данных за счет понижения уровня корреляционного шума.

Параметризация скоростной модели позволяет контролировать глубинность целевых аномалий скоростной модели среды, как следствие повышает точность определения структуры ВЧР.

Программа расчета низкочастотных свип-сигналов предназначена для использования при проведении полевых сейсморазведочных работ с различными моделями виброисточников.

Разработанная методика и модификация алгоритма томографической инверсии могут быть использованы для повышения информативности сейсмических съемок с виброисточником при построении скоростных моделей ВЧР как в разведочных, так и в малоглубинных приложениях.

Достоверность и апробация результатов.

Достоверность результатов реализации методики получения и обработки вибросейсмических данных с подавлением корреляционного шума и модификации лучевой томографии с подбором параметризации модели, определялась посредством сравнения с результатами, полученными на аналогичных реализациях из промышленных пакетов обработки.

Основные результаты работы представлены на многочисленных международных и российских конференциях. К ним относятся:

- Проблемы геологии и освоения недр 2017: Труды XXI Международного симпозиума им. акад. М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвящ. 130-летию со дня рожд. проф. М.И. Кучина;
- Интерэкспо ГЕО-Сибирь 2018: XIV Международный научный конгресс (г. Новосибирск, 23-27 апреля 2018 г.): Междунар. науч. конф.

"Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология";

- EAGE 2020. 26th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Held at Near Surface Geoscience;
- Интерэкспо ГЕО-Сибирь 2020 "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология";
- Интеллектуальный анализ данных в нефтегазовой отрасли. Вторая региональная конференция EAGE в России и странах СНГ 2021;
- ПроГРРесс-23. Геологоразведка как бизнес: Сборник материалов 3-й международной научно-практической конференции;
- Интерэкспо ГЕО-Сибирь 2024 ХХ Международный научный конгресс.
 Международная научная конференция "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология"

Исследование поддерживалось грантом РФФИ 19-35-90114 «Развитие методов сейсмической томографии для повышения точности построения скоростных моделей в верхней части разреза».

Публикации Основные результаты по теме диссертации изложены в 19 печатных изданиях, из которых 6 — в рецензируемых научных журналах (рекомендованы перечнем Высшей аттестационной комиссии), 13 — в сборниках трудов конференций. На разработанный алгоритм и его программные модули получено 3 свидетельства о государственной регистрации программ ЭВМ.

Благодарности

Автор выражает искреннюю признательность и благодарность своему научному руководителю, к.ф.-м.н. А.А. Дучкову за постановку задачи, многолетнее сопровождение, постоянное внимание и оказанную поддержку в процессе выполнения исследования;

Особую благодарность за поддержку темы исследования автор выражает своим коллегам Н.А. Гореявчеву, А.С. Матвееву, к.ф.-м.н. А.В. Яблокову за поддержку темы исследования. Автор благодарит коллег д.ф.-м.н. Г.М. Митрофанова, д.г.-м.н. И.Ю. Кулакова, д.ф.-м.н. М.И. Протасова, д.г.-м.н. В.Д. Суворова за критику и ценные советы, которые стали важным вкладом в развитии исследования. Автор выражает искреннюю благодарность Самойловой В.И. за конструктивное обсуждение направления исследования и методическую работу; коллегам из ООО «ГАЗПРОМНЕФТЬ НТЦ» Литвиченко Д.А., Стекленеву В.В., Короткову А.Б. за сопровождение исследования и ценные советы.

Глава 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ РЕШЕНИЙ И РАЗРАБОТОК

В практике обработки сейсморазведочных данных используется термин «верхняя часть разреза» (ВЧР), чтобы обозначить сильно-неоднородный приповерхностный интервал геологической среды, который значительно обработку отраженных (MOB-O Γ T). осложняет данных метода волн Осложняющими факторами ВЧР являются перепады высот рельефа, сильные латеральные неоднородности, высокоскоростных наличие слоев многолетнемерзлых пород, наличие неоднородной зоны малых скоростей (ЗМС) и т.д. [Долгих и др., 2019].

В нефтегазовой сейсморазведке строение ВЧР обычно не является самоценным с геологической точки зрения, а необходимо для корректного учета при построении глубинно-скоростных моделей (ГСМ) в процессе обработки данных метода отраженных волн. Неправильный учет особенностей строения ВЧР приводит к ложным кинематическим и динамическим аномалиям глубинных горизонтов [Сысоев, Горелик, 2017]. Учет неоднородностей ВЧР при геологоразведке месторождений углеводородов выполняется различными способами. Влияние структуры ВЧР принято делить на длиннопериодную и короткопериодную вариации (по сравнению с максимальными удалениями сейсмической расстановки). Короткопериодные вариации строения ВЧР снижают когерентность при суммировании сейсмограмм ОГТ и могут быть скорректированы процедурой оценки остаточных статических поправок. Для устранения длиннопериодных вариаций необходимо построить скоростную модель ВЧР [Давлетханов, 2017]. Затем либо рассчитываются и вводятся априорные статические поправки, либо модель ВЧР включается в общую глубинно-скоростную модель [Долгих, 2010; Чернышов и др., 2022].

Определение скоростной модели ВЧР также является основной целью инженерных (малоглубинных) сейсмических исследований при решении самых разнообразных прикладных задач. Малоглубинная сейсмика используется при инженерно-геологических изысканиях при строительстве [Горяинов, 1992], для

определения глубин и геометрии залегания рудных тел [Караев, Рабинович. 2000], изучения толщ многолетнемерзлых пород и участков локального протаивания [Скворцов и др., 2011; Курленя, 2016], сейсмического районирования при проектировании крупных инженерных сооружений. Основным результатом обработки является скоростная модель, интерпретация которой дает информацию о геологической структуре и физико-механических свойствах ВЧР [Владов, Капустин, 2014; Курленя, 2016].

В данной работе буду рассматриваться самые распространенные наземные системы наблюдений при изучении ВЧР (для скважинных сейсмических исследований существуют свои модификации методов обработки [Чугаев, 2024]). Основную информацию о скоростной модели ВЧР для наземных систем наблюдений несут преломленно-рефрагированные волны. При этом следует учитывать постоянный рост объемов сейсморазведочных данных, особенно, при использовании современных высокопроизводительных технологий вибрационной сейсморазведки [Шнеерсон, Жуков, 2015]. Большие объемы данных требуют автоматизации этапов обработки. Поэтому для построения скоростной модели наиболее универсальным в настоящее время является алгоритм лучевой томографии [Нолет, 1990; Koulakov, 2010]. А данными входными служат годографы времен первых вступлений сейсмических Для построения волн. которых известно несколько автоматических и полуавтоматических алгоритмов [Akram, Eaton, 2016], но снятие (пикировка) времен первых остается нетривиальной задачей из-за сильной изменчивости формы сигнала в первых вступлениях и низкого отношения сигнал/шум в исходных сейсмограммах. Особенно актуальна задача повышения точности снятия времен первых вступлений для данных вибрационной сейсморазведки, из-за наличия дополнительных видов шума (корреляционный шум, гармонический шум).

Стоит также отметить, что времена прихода преломленнорефрагированных волн используются при глубинном сейсмическом зондировании (ГСЗ). В этих задачах удается прослеживать волн не только в

первых, но также в последующих вступлениях [Суворов и др., 2023], а также применяется метод динамического пересчета на основе винеровских фильтров для усиления и улучшения прослеживания головных волн [Еманов и др., 2008]. Отметим, что современные региональные сейсмические исследования также могут проводиться с использованием мощных вибрационных источников [Селезнев и др., 2013]. Также продолжается развитие высокочастотных вибрационных источников для малоглубинных сейсмических исследований [Яблоков и др., 2022].

Далее в главе приводится более детальный обзор современных способов повышения качества вибрационных данных, а также методов построения скоростной модели ВЧР.

1.1 Анализ известных современных способов повышения качества вибрационных данных

Известно, что вибрационные источники сейсмических волн обладают рядом преимуществ перед взрывными. Для них меньше ограничений по требованиям экологичности и безопасности проведения работ, есть больше возможностей лля изменения параметров возбуждения, позволяющих сейсмического форму зондирующего контролировать сигнала. высокопроизводительные технологии проведения вибросейсмических работ позволяют сократить время получения данных [Шнеерсон, 1990]. Но качество зачастую уступает качеству взрывных источников [Фиников, данных Шалашников, 2021]. Потеря качества связана с техническими проблемами возбуждения низких и высоких частот – нелинейными искажениями из-за несоответствия фактического сигнала, излучаемого в среду, пилотному свипсигнала [Чернышов и др., 2024]. Также при высокопроизводительных работах (например, slip-sweep) возникает дополнительный источник помех в виде сигнала от соседних возбуждений. Все эти помехи приводят к снижению вибросейсмических Выделяется качества данных. два вида помех,

осложняющих вибросейсмические данные – корреляционные помехи и гармонический шум.

Повысить качество вибрационных данных можно повышением плотности получаемых в поле данных, использованием оптимальных параметров возбуждаемого свип-сигнала и специальными алгоритмами обработки [Жуков и др., 2022; Селезнев и др., 2013].

Качество получаемых данных напрямую зависит от параметров свипсигнала и его возбуждения: полоса частот, длительность, длина окон заглаживания на краях (тэйперов), количество накоплений, количество источников в группе. Амплитуда полезного сигнала линейно растет с увеличением длительность свип-сигнала и количеством накоплений. При этом количество вибраторов в группе обычно ограничивается общим количеством вибрационных установок в полевой партии. Необходимо также учитывать, что при группировании увеличивается площадь генерации сигнала (ближняя зона источника). В практике проведения полевых работ не рекомендуется использовать больше 5-7 вибрационных источников в группе. Поэтому основным ограничением параметра длительности свип-сигнала является требуемая скорость проведения сейсморазведочных работ.

Расширение полосы частот генерируемого вибрационного сигнала позволяет увеличить глубинность и разрешенность данных, снизить уровень корреляционных шумов, повысить отношение сигнал/помеха [Шнеерсон, Жуков, 2013]. Частотно-зависимое затухание в среде сильно снижает верхнюю границу частот целевого сигнала от глубоких отражателей. Проблема низких частот (НЧ) связана с возможностью их генерации. Так, возможное усилие вибрационной установки на низких частотах оказывается существенно ниже, чем усилие, развиваемое в рабочей полосе (из-за особенностей работы гидравлических вибрационных установок на низких частотах). Для современных вибраторов возможность работать на полном приводе доступна с 5.4 Гц (Nomad 65 Neo) [Wei et al., 2018; Li et al., 2019]. Также уровень нелинейных помех существенно возрастает для частот меньше 5 Гц [Чернышов

и др., 2024]. По этой причине наиболее распространёнными на производстве в настоящее время являются линейные свип-сигналы с минимальной частотой 5-7 Гц.

Одним из решений для понижения начальной частоты свип-сигнала является генерация нелинейных свип-сигналов. Примером такого типа сигналов является «maximum displacement sweep» [Шнеерсон, Жуков, 2013]. Этот свипсигнал позволяет генерировать частоты меньше, чем частота выхода вибратора на полный привод, компенсируя меньшую амплитуду воздействия на грунт за счет меньшей скорости развертки на низких частотах [Чернышов и др., 2024]. В идеале это позволит сформировать сигнал с ровной «полочкой» спектра во всем диапазоне частот, включая низкие.

Для повышения качества получаемых коррелограмм в публикациях предлагаются различные методы обработки исходных данных (виброграмм), от публикации к публикации эффективность методов значительно варьируется и эффекты от применения одного и того же метода оказываются не согласованными. Поэтому являются актуальными задачами оценка эффективности методов и разработка методик обработки вибрационных данных.

Основным отличительным этапом обработки данных вибрационной сейсморазведки взрывной виброграмм от является переход ОТ к [Yilmaz, 2001]. Стандартным подходом к получению коррелограммам коррелограмм считается взаимная корреляция трасс виброграммы с пилотным свип-сигналом. В Фурье области при этом выполняется перемножение спектров трасс и пилотного свип-сигнала, эффект во многом аналогичен полосовой фильтрации – частоты за интервалом пилотного свип-сигнала фильтруются. Указанный стандартный подход порождает корреляционные шумы, а также не позволяет подавить гармонические шумы, которые, в частности, осложняют область первых вступлений.

Корреляционный шум.

Причиной появления корреляционных шумов является несоответствие пилотного свип-сигнала фактическому сигналу, передаваемому в грунт. Поэтому в основе большинства методов уменьшения корреляционных шумов лежит расчет свип-сигналов, приближенных к фактическому. Одним из таких сумма сигналов считается взвешенная сигналов с акселерометров, установленных на плитах вибраторов – усилие на грунт (GF) [Wei, 2017]. Такой сигнал не полностью учитывает искажение свип-сигнала при передаче его от плиты в грунт, но оказывается заметно ближе к истинному сигналу чем пилотный свип [Van Der Veen et al., 1999; Saragiotis et al., 2010], при этом напрямую GF не может быть использован для корреляции, так как содержит гармонические колебания [Денисов, 2020].

Альтернативным способом перехода от виброграмм к коррелограмме является детерминистическая деконволюция. Если при корреляции в области одномерных спектров Фурье происходит перемножение спектров, при деконволюции спектры делятся. Деконволюция позволяет использовать сигнал GF вместо пилотного, так как в отличии от корреляции гармоники GF не накладываются на положительные времена коррелограммы.

В [Vedanti et al., 2020] рассматриваются результаты практических исследований применению корреляции по И детерминистической деконволюции в частотной области к виброграммам с пилотным свип-сигналом и сигналом GF. Также рассматривается влияние разных способов перехода к коррелограммам на результат деконволюции сжатия и предсказывающей деконволюции при дальнейшей обработки МОВ ОГТ. Отмечается, что: 1) для корреляции может быть использован только пилотный свип-сигнал, из-за наличия гармоник в сигнале GF, что совпадает с выводами приведенными выше, 2) детерминистическая деконволюция виброграмм в частотной области дает идентичные результаты с корреляцией на синтетических данных, но для реальных данных результат корреляции оказывается хуже, 3) на реальных данных отмечается существенное повышение разрешающей способности 4) данных (отраженных волн), отмечено существенное повышение

разрешающей способности и отношения сигнал/шум при использовании предсказывающей статистической деконволюции относительно деконволюции сжатия на коррелограммах, полученных в результате деконволюции виброграмм с сигналом GF. Оценка качества производилась по сигналу отраженных волн на сейсмограммах и суммарных разрезах, относительно сигнала первых вступлений улучшений не выявлено.

В работе [Baradello, Accaino, 2013] рассмотрены методики обработки вибрационных данных включающие статистические предсказывающую деконволюцию и деконволюцию сжатия, применяемые к виброграммам, GF. корреляции виброграмм с пилотным свип-сигналом И сигналом Отмечается, что в условиях наличия высокоамплитудных помех статистическая предсказывающая деконволюция виброграмм может повысить отношение сигнал/шум. В работе не показана разница применения корреляции виброграмм с пилотным свип-сигналом и сигналом GF, хотя, как показано на рисунке 23, появление шумов неизбежно. Из-за наличия высокоамплитудных помех на приводимых примерах визуально нельзя выделить шум, появляющийся из-за наличия гармонических помех в сигнале GF.

В [Ма et al., 2020] на качественном уровне оценивается преимущество использования сигнала GF для деконволюции виброграмм относительно корреляции с пилотным свип-сигналом. Отмечается расширение эффективной полосы частот сигнала, улучшение фазы сигнала отраженных волн, подавление гармонических помех сигнала, вследствие которого улучшается качество прослеживания первых вступлений. Сделан вывод о высокой эффективности методики. Апробация методики проводилась на данных с низким уровнем корреляционных шумов, повышение качества прослеживания первых вступлений корреляционных шумов, повышение качества прослеживания первых вступлений повышение качества прослеживания первых вступление качества прослеживания первых вступлений повышение качества прослеживания первых вступление качества прослеживания первых вступлений повышение качества повышение.

Наряду с различными подходами к переходу от виброграмм к коррелограммам исследователями предлагаются алгоритмы фильтрации виброграмм. В работах [Долгих и др., 2019; Гафаров, 2012] предлагается метод нестационарной полосовой фильтрации для повышения качества коррелограмм.

Алгоритм заключается в фильтрации сигнала на виброграммах в полосе времячастота укладывающейся в результирующую коррелограмму. Эффект фильтрации рассматривается только на уровне виброграмм, что не позволяет оценить эффективность алгоритма для последующей обработки данных.

Гармонический шум.

Методики высокопроизводительных работ позволили существенно увеличить плотность получаемых данных при умеренных затратах времени. Наиболее распространенными и отработанными полевыми партиями являются методики, заключающиеся в одновременном возбуждении свип-сигналов несколькими источниками, разделенными по времени (метод slip-sweep) [Rozemond, 1996] или расстоянию (метод DS3) [Bouska, 2010]. Для обработки таких данных необходимо применять дополнительные этапы обработки, направленные на разделение волновых полей разных возбуждений и подавления гармонических помех [Акуленко и др., 2023].

В [Денисов, 2020] для подавления гармонических помех вначале предлагается построить модель шума с помощью серии коррелляций коррелограммы с пилотными свип-сигналами разных частотных диапазонов, а потом произвести адаптивное вычитание помех из исходных данных. Этот подход кажется особо привлекательным в силу простоты реализации. Другой метод направлен на подавление основной энергии гармонического сигнала путем его оценки по коррелограмме второго источника [Martin, Munoz, 2010]. В этом методе происходит незначительное подавление полезного сигнала. Можно получать оценку сигнала гармоник через фазовый поворот основной моды сигнала [Baobin et al., 2012]. Недостатком метода является необходимость использования сигнала последнего источника, который не осложнен гармониками следующего возбуждения. В [Abd El et al., 2011] предлагается определять в коррелограммах интервалы с пиковыми амплитудами, где проводить спектральный анализ для оценки гармонических составляющих. «Негативное влияние на точность оказывает проведение анализа в заведомо малых скользящих окнах» [Денисов, 2020].

Есть также ряд методов подавления гармонических помех на основе использования сигнала усилия на грунт – взвешенной суммы записей акселерометров, установленных на двух плитах вибратора (Ground Force, GF). Подход, использующий разложение сигнала GF на фундаментальную и гармоническую составляющие для фильтра, который потом преобразует коррелограммы в модель гармонического шума [Sicking et al, 2009]. В работе [Zhang et al., 2012] сигнал последнего источника (который не осложнен гармониками следующего вибратора) коррелируется с сигналом основной моды и гармоник GF, после этого строится антикорреляционный фильтр для подавления гармоник. Еще один метод, основанный на использовании сигнала GF приводится в [Акуленко и др., 2023]. Необходимо отметить, что использование последней группы методов требует записи отдельного сигнала GF, который не всегда имеется в наличии при обработке данных.

1.2 Анализ известных современных алгоритмов построения скоростной модели ВЧР

К задаче построения скоростной модели среды по сейсмическим данным существует два подхода. Первый подход состоит в решении обратной кинематической задачи, когда входными данными для ее решения являются времена прихода целевых сейсмических волн; при изучении ВЧР – это рефрагированно-преломленные волны. Второй подход состоит в использовании самих волновых форм для построения скоростной модели, его можно отнести к динамической обратной задаче.

В рамках второго подхода активно развивается метод полноволновой инверсии (Full Waveform Inversion, FWI) [Virieux et al., 2014; Чеверда, Гадыльшин, 2018; Protasov et al., 2023]. Входными данными являются сами сейсмические трассы, т.е. в инверсии используются все типы волн. Подход позволяет восстанавливать достаточно детальные скоростные модели, но требователен к качеству входных данных и начальной скоростной модели.

Также он требует больших вычислительных мощностей для численного решения волнового уравнения. Поэтому он не всегда может быть применен на практике, особенно для больших объемов данных.

Методы решения обратной кинематической задачи имеют более долгую историю. Их можно также разделить на две группы по типу параметризации скоростной модели:

– слоистая модель задается геометрией границ, внутри слоя скорость берется либо постоянной, либо слабо меняется внутри слоя по латерали и по простому закону (например, линейному) по вертикали;

сеточная модель имеет произвольные значения скорости в точках 2D или
 3D сетки, т.е. требуется больше модельных параметров.

К ранним алгоритмам построения слоистых моделей относятся модификации метода T0` (plus-minus, GRM) [Backus, Gilbert, 1967; Пузырев, 1997; Yilmaz, 2015], метод прямого лучевого моделирования [Суворов и др., 2013], метод полей времен [Епинатьева, 1990]. В этих методах применяется ручное разбиение годографов на ветки разных головных волн, что осложняет автоматизацию их применения для больших объемов данных, характерных для сейсморазведки МОВ ОГТ. Но они продолжают активно использоваться для инженерных сейсмических исследований и глубинного сейсмического зондирования.

Для обработки больших объемов данных широкое развитие получили методы томографической инверсии. Суть томографического подхода заключается в итеративном уточнении начальной скоростной модели, на каждой итерации изменения считаются небольшими. Главным образом, используется лучевая томография [Нолет, 1990], но также есть варианты томографии на основе численного решения линеаризованного уравнения эйконала без трассировки лучей [Кабанник, 2005]. Параметризация модели может быть, как слоистой [Гольдин и др., 1985; Zelt, 1992], так и сеточной [Нолет, 1990]. В большинстве коммерческих программных пакетов по обработке данных сейсморазведки для построения скоростных моделей ВЧР

используются алгоритмы томографической инверсии времен первых вступлений в варианте слоистой и гладкой (сеточной) модели.

Алгоритмы слоистой томографической инверсии [Zelt, 1992] объединяет простая параметризация модели – изменение скорости в слое допускается только по латерали, границы считаются локально плоскими. Также используется упрощенный подход к решению прямой задачи – не учитывается рефракция лучей, недоучет кривизны границ, отсюда следует невысокая точность построения границ и распределения скоростей в слоях. Такие упрощения позволяют обрабатывать большой объем данных за короткое время.

Несмотря на указанные недостатки, использование алгоритмов на основе слоистых скоростных моделей ВЧР позволяет точнее учесть неоднородности, чем алгоритмы с гладкими моделями в регионах с простым строением ВЧР (прямолинейные годографы с явными изломами). При построении таких моделей не требуется высокой точности определения локальных аномалий, в алгоритмах учитываются резкие перепады скоростей на границах, в отличие от алгоритмов построения гладких моделей. Именно такие модели характерны для районов юга западной Сибири и Оренбургской области.

При томографической инверсии для построения гладких моделей параметризацией модели считается значение скорости рефрагированной продольной волны в каждой точке заданной сетки [Nolet, 2012]. Различные реализации метода лучевой томографии отличаются: методом решения прямой задачи для расчета времен волн первых вступлений, подходом к построению расчетной сетки модели, параметризацией модели, подходом к регуляризации задачи, алгоритмом решения системы линейных уравнений.

Регуляризация задачи.

Наиболее распространенным методом регуляризации считается добавление в основной функционал для минимизации слагаемого - вторая норма производной (нулевого, первого или второго порядка) вектора неизвестных с весовым множителем, регулирующим вклад слагаемого в общий функционал [Tarantola, 2005; Jiang, Zhang, 2013]. Регуляризация производной

нулевого порядка направлена на понижение значений находимых неизвестных (аномалий параметров модели), что хорошо согласуется с основным предположением томографической инверсии о маленьких значениях аномалий начальной модели, которые могут быть найдены за одну итерацию.

Регуляризация производной первого и второго порядка направлена на уменьшение градиента находимых неизвестных при увеличении весового множителя. Для алгоритма томографии это выражается в гладкости результирующей модели.

Основным недостатком томографической инверсии для гладких моделей является отсутствие резких градиентов скорости на границах слоев и локальных аномалиях, что не позволяет с высокой точностью определить их местоположение в результирующей модели. Для компенсации этого недостатка применяются различные модификации метода регуляризации функционала total variation (TV). Подход заключается в добавлении к функционалу слагаемого первой нормы производной первого порядка по каждой пространственной координате вектора неизвестных [Anagaw, Sacchi, 2012]. Такая регуляризация вносит нестабильность в сходимость инверсии и очень чувствительна к весовым параметрам, ограничивающих ее эффективность и выбираемым пользователем [Jiang, Zhang, 2018]. Её модификация MTV [Lin, Huang, 2015] успешно применялась на реальных данных МОВ ОГТ для построения скоростной модели ВЧР и расчета статических поправок, что позволило повысить точность учета неоднородностей ВЧР [Jiang, Zhang, 2018]. Но вместе с повышением градиента скорости на границах модели увеличивалось и количество локальных скоростных аномалий внутри слоев, геологически не интерпретируемых, что может привести к погрешностям расчета статических поправок для данных из другого региона.

Подход к построению расчетной сетки модели.

Наиболее распространенным способом задания расчетной сетки в алгоритме томографической инверсии, из-за простоты реализации, является

построение регулярной прямоугольной сетки с значением скорости волн в каждой ячейке [Sambridge, 1990; Кабанник, 2005].

Для уменьшения неединственности решения обратной задачи в [Zhou, 2003] применяется переменная по размеру ячейки вычислительная сетка. С каждой томографической итерацией шаг вычислительной сетки уменьшается. Алгоритм рассматривался в [Zelt et al., 2013] при проведении слепого тестирования 14 алгоритмов лучевой сейсмической томографии, показано что алгоритмы в примерно одинаковой степени ошибаются с определением глубины границ и скоростями в слоях вблизи границы.

В алгоритме [Koulakov et al., 2010] используется адаптивная нерегулярная расчетная сетка, размер ячейки зависит от плотности лучей в соответствующей области модели. Подход направлен на уменьшении неустойчивости решения обратной задачи.

Параметризация скоростных моделей.

Во всех известных алгоритмах аномалии модели параметризуются либо скоростью, либо медленностью рефрагированных волн [Zelt, 2021], что приводит к фокусировке алгоритма на малых или больших глубинах результирующей скоростной модели, а значит приводит к менее точному результату относительно алгоритмов с адаптивным подбором параметризации аномалий. Алгоритмы построения сеточной скоростной модели в регионах со сложными приповерхностными структурами позволяют получить скоростные модели ВЧР точнее, чем слоистые скоростные модели.

В [Bianco, Gerstoft, 2018] модель параметризуется через значения медленности, подбор модели осуществляется с помощью набора рассчитанных заранее вейвлет функций Хаара. Алгоритм протестирован на серии синтетических данных, показано хорошее восстановление положения резких градентов скорости (границ) и локальных аномалий медленности. Аналогичный подход с использованием вейвлет функций Хаара предлагается в [Тихоцкий и др., 2011], апробация алгоритма проводится на синтетических данных, авторы указывают основным преимуществом алгоритма быстродействие.

В последние несколько лет развивается альтернативный подход к инверсии времен первых вступлений томографическим методом с применением нейронных сетей [Li et al., 2019; Guo et al., 2019]. Авторы отмечают повышение точности и скорости построения скоростных моделей среды относительно классического алгоритма томографии. Оценка эффективности алгоритма рассматривается только на синтетических данных. В настоящее время подход не распространен для решения научных и производственных задач.

Глава 2. МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ

В главе 2 представлено описание предлагаемых этапов методики получения и обработки вибросейсмических данных для понижения уровня корреляционных и гармонических шумов. Приводится качественное и количественное сравнение предлагаемых автором процедур со стандартными подходами.

2.1 Стандартный подход к обработке вибросейсмических данных

В стандартном подходе к получению и обработке вибросейсмических данных можно выделить следующие этапы, отличные от сейсморазведки со взрывными источниками:

1) при проведении полевых работ генерируется линейный свип-сигнал в диапазоне частот 5-100 Гц;

2) обработка полевых виброграмм путем их корреляции с пилотным свипсигналом для получения коррелограмм (аналог сейсмограмм от взрывного источника, к которым далее применяется стандартный граф обработки);

3) при проведении высокопроизводительных вибросейсмических работ (метод slip-sweep) для понижения уровня гармонических шумов задержка по времени между возбуждениями (slip time) увеличивается для уменьшения уровня шума от последовательных возбуждений.

Линейный свип-сигнал рассчитывается в предположении линейного изменения частоты от времени и одинаковой амплитуды на всех частотах, результатом становится одинаковая амплитуда для всего диапазона частот генерируемого свип-сигнала. При проведении сейсморазведочных работ задаются основные параметры свип-сигнала:

– начальная частота (f_{μ});

– конечная частота (f_k);

– длительность (t_k) .

Параметры выбираются в зависимости от необходимого частотного диапазона данных для исследуемого региона и скорости производства работ. Формула расчета линейного свип-сигнала:

, (1) где – начальная фаза свип-сигнала, - зависимость частоты свип-сигнала от времени, *А* – амплитуда.

Функция зависимость частоты линейного свип-сигнала:

, (2) В соответствии со сверточной моделью трасса виброграммы (отклик среда на зондирующий свип-сигнал) имеет вид:

, где – время, – виброграмма, – последовательность коэффициентов отражения, – свип-сигнал в источнике, - минимально-фазовый оператор, описывающий фильтрующие свойства геологической среды.

В частотной области выражение для виброграммы преобразуется:

(4)

где – частота, , , и – спектры Фурье от сигналов , , и соответственно.

Реальный зондирующий сигнал, который уходит в среду, не соответствует пилотному свип-сигналу, т.к. из-за нелинейных процессов взаимодействия виброисточника с грунтом оказывается осложнен гармониками наряду с основной модой пилотного свип-сигнала:

, (5) где, и т.д. – основная и последующие моды колебаний зондирующего сигнала, ушедшего в среду. Заметим, что наличие гармонических мод приводит не только к появлению дополнительных членов в спектре, но и изменяет амплитудный спектр основной моды, т.к. часть энергии основной моды затрачивается на генерацию кратных частот (т.е.).

Стандартный зондирующий свип-сигнал состоит в развертке сигнала во времени. Обычный спектр Фурье удобен для анализа стационарных сигналов,

частотный состав которых не меняется во времени. Поэтому иллюстрировать частотный состав свип-сигнала проще в частотно-временном представлении – будем называть их спектрограммами. Для этого в самом простом случае могут быть использованы варианты оконного преобразования Фурье (например, Габора или Стоквелла) или вейвлет-преобразований [Любушин, 2007; Wang, 2022].

На Рисунке 1, слева представлена спектрограмма (результат преобразования Габора) стандартного пилотного свип-сигнала с линейной разверткой частоты. На рисунке хорошо видно, как с течением времени частота сигнала постепенно повышается. На Рисунке 1, в середине показана спектрограмма реальной виброграммы. Видно, что основная мода колебаний становится «толще», т.к. в ней содержится отклик среды от среды, но также выше нее появляются лепестки гармонических мод более высокого порядка.

Стандартным подходом к получению коррелограмм является взаимная корреляция трасс виброграммы с пилотным свип-сигналом [Шнеерсон, 1990]. Результатом корреляции является коррелограмма которая далее идет в стандартный граф обработки.

Если бы в среду удавалось передавать идеальный пилотный свип-сигнал (см. формулу (4)), то после корреляции виброграммы с пилотным свипсигналом получаем:

, (6) где - спектр трассы коррелограммы, - комплексно-сопряженный спектр пилотного свип-сигнала.

Формой сигнала в коррелограмме в этом случае будет нуль-фазовый импульс Клаудера (автокорреляционная функция пилотного свип-сигнала). Форма этого импульса зависит от частотного диапазона развертки свипсигнала. Если его расширение в сторону высоких частот приводит к сужению основного пика, то расширение в сторону низких частот – к уменьшению вторичных экстремумов.

Для реалистичного зондирующего сигнала с гармониками корреляция виброграммы с пилотным свип-сигналом в области Фурье выражается в виде:

, (7) где - спектр трассы коррелограммы, - комплексно-сопряженный спектр пилотного свип-сигнала.

На рисунке 1, справа показана спектрограмма после корреляции виброграммы с пилотным свип-сигналом. В пространстве спектрограмм процедура корреляции приводит к вертикали основную моду пилотного свипсигнала; целевая область, где содержится целевой сигнал отклика среды, показан белой рамкой. При этом сигнал, не попадающий в целевую область, не войдет в финальную коррелограмму. Таким образом, корреляция имеет эффект переменной по времени полосовой фильтрации, применяемой к виброграмме [Чернышов и др., 2024].



Рисунок 1 - Спектрограммы трасс, слева - пилотного свип-сигнала, в центре – виброграммы, справа - коррелограммы, белым выделена целевая область коррелограммы.

Приведенное описание помогает понять источник двух основных типов помех, характерных для вибросейсмических данных: корреляционные и гармонические помехи.

Корреляционным шумом называют вторичные экстремумы импульса в коррелограмме, которые возникают при корреляции из-за несоответствия фактического зондирующего сигнала в среде и пилотного свип-сигнала (см. формулу 7). Легче всего оценить амплитуду такого вида помех в областях до

первых вступлений, хотя шумы будут генерироваться также для всех волн в последующих вступлениях. На рисунке 2 приведена коррелограмма, где красным выделены области прослеживания корреляционных шумов от сигнала в первых вступлениях (слева) и от сигнала поверхностной волны (справа).

Также в эту область попадают вторичные экстремумы, связанные с ограниченностью частотного диапазона зондирующего свип-сигнала, особенно на них влияют низкие частоты. Проблемы, которые могут быть вызваны наличием корреляционных шумов в обработке: сложность снятия времен первых вступлений, качество сигнала после приведения к минимальнофазовому виду, осложненное помехами волновое поле.



Рисунок 2 - Пример коррелограммы, красным – области прослеживания корреляционных шумов до первых вступлений.

Гармонический шум неизбежно возникает в виброграммах из-за нелинейных процессов при воздействии на грунт. После корреляции происходит некоторое искажение основной моды сигнала, сами гармонические помехи проявляются на коррелограммах на отрицательных временах, так что не представляют проблем при обработке. Стоит отметить, что для высокопроизводительных работ (slip-sweep) гармоники свип-сигнала от последующего воздействия могут накладываться на сигнал от текущего возбуждения (Рисунок 3).



Рисунок 3 - Коррелограмма от двух последовательных возбуждений, краснымуказаны области прослеживания гармонических шумов от второго возбуждения.

2.2 Расчет низкочастотных свип-сигналов

Из-за особенностей гидравлических вибрационных установок низкие частоты невозможно генерировать с максимальной амплитудой (усилием источника). Основой характеристикой виброисточника является график изменения максимального усилия источника, основным параметром которого является значение частоты выхода на максимальное усилие вибрационной установки или полного привода (f_x). Функция изменения усилия виброисточника на частотах ниже (f_x) имеет следующий вид, не зависящий от модели вибрационной установки [Wei et al., 2018]:

(8) где – масса реакционной массы, – ход реакционной массы, *f* – частота сигнала.

Таким образом, график зависимости усилия вибратора от частоты на низких имеет вид:

Примеры этой зависимости для разных моделей вибрационных установок приведены на рисунке 4 [Wei et al., 2018; Li et al., 2019].



Рисунок 4 - График зависимости усилия вибратора от частоты на низких частотах для разных моделей вибрационных установок [Wei et al., 2018].

Сигнал с максимальной разрешенностью по времени в заданной полосе частот должен иметь амплитудный спектр в виде «полочки» (одинаковые значения амплитуды на каждой частоте). Тогда для достижения одинаковой амплитуды свип-сигнала на низких частотах необходимо компенсировать сниженную амплитуду (усилие установки) на низких частотах за счет увеличения длительности генерации низких частот [Шнеерсон, Жуков, 2013].

Тогда можно рассмотреть более общий вид формулы развертки свипсигнала:

, (10) где – начальная фаза свип-сигнала, - зависимость частоты свип-сигнала от времени.

Расчет амплитуд свип-сигнала выполняется по формуле (9). Зависимость можно найти из условия на обратную к ней величину [Wei et al., 2018]:

(9)

где – ожидаемая плотность спектральной мощности на каждой частоте, это будет константа в нашем случае . Это выражение показывает, что время, потраченное на каждой частоте, должно быть обратно пропорционально квадрату занижения мощности источника на этой частоте.

Свип-сигнал можно разделить на две части: линейную и нелинейную. При частотах больше частоты выхода на максимальное усилие, вибрационная установка может работать с постоянным усилием (*DF* будет константой). Тогда зависимость времени от частоты развертки будет линейной функцией. На частотах ниже выхода на максимальное усилие *DF* рассчитывается по формуле 8, изменение времени от частоты будет нелинейным и производная функции изменения времени от частоты (скорость развертки свип-сигнала) будет увеличиваться при увеличении *DF*.

При линейном изменении частоты от времени не составляет труда рассчитать скорость развертки, чтобы свип-сигнал удовлетворял заданной длительности. Для нелинейного случая в публикациях отсутствуют явные формулы для реализации соответствующих расчетов. DF^2 должен быть меньше *psd* на низких частотах и больше на частотах после выхода на константу.

Функция рассчитывается из производных для двух частей, до частоты выхода на полное усилие и после, см. Рисунок 5. Производная для линейной части графика () – это константа [Чернышов и др., 2024]. Для интервала нелинейной части () производная рассчитывается из производной уравнения 11. Тогда интеграл от производных для двух интервалов имеет вид:

– для нелинейного интервала;

– для линейного интервала.



Рисунок 5 - График изменения частоты свип-сигнала от времени развертки.

Константа вычисляется для точки, константа для точки. Далее рассчитывается неизвестная из равенства функций в точке :

(12)

Тогда явные формулы функции для двух интервалов принимают вид: - для ,

Таким образом, получаем аналитические выражения для расчета НЧ свип-сигнала по формуле 10, включая изменение амплитуды (формула 9) и развертку по частоте (формула 13). К стандартным параметрам свип-сигналов добавляется параметр частоты выхода на максимальное усилие (f_x). Так что форма НЧ свип-сигнала задается четырьмя параметрами:

– начальная частота (f_{μ});

- конечная частота (f_k) ;
- длительность (t_k) ;
- частота выхода на максимальное усилие (f_x).

Обычно f_x варьирует в зависимости от технических характеристик вибрационных установок и берется из ее паспортных данных. На Рисунке 6 приведен рассчитанный НЧ свип-сигнал с параметрами: $f_{\mu} = 3$ Гц, $f_x = 6$ Гц, $f_{\kappa} =$ 100 Гц, $t_{\kappa} = 14$ сек. Традиционно на краях свип-сигнал умножается на заглаживающее окно (тэйпер) для уменьшения эффекта Гиббса; в качестве окна сглаживания на краях было выбрано окно Хамминга, длина тэйпера = 480мс [Чернышов и др., 2024].



Рисунок 6 - Рассчитанный НЧ свип-сигнал.

На низких частотах спектр рассчитанного НЧ свип-сигнала в среднем является константой, хоть и неизбежно осложняется эффектном Гиббса, см. Рисунок 7.


Рисунок 7. Амплитудный спектр рассчитанного НЧ свип-сигнала.

2.3. Анализ возможности генерации низкочастотных свип-сигналов по данным опытно-методических работ

Для апробации разработанного способа генерации НЧ свип-сигналов были запланированы и проведены опытно-методические работы (OMP) на базе вибрационных установок Nomad 65Neo в южной части Волго-Уральского региона. В рамках работ решались две задачи:

1. Оценка оптимального усилия вибратора на низких частотах 3-5 Гц.

2. Оценка возможности генерации НЧ свип-сигналов разработанным способом при проведении сейсморазведочных работ.

Соответственно, программа тестирования НЧ свип-сигналов состояла из двух фаз.

ФАЗА 1. Определение максимального усилия, на котором вибратор может воспроизводить низкие частоты (НЧ) без существенных искажений.

Тестирование выполнялось индивидуально для каждого вибратора одной группы путем генерации монохромных сигналов: длительность – 10 секунд, краевой тэйпер – 5%.

При работе с виброисточником обычно выбирают максимальное усилие вибратора – задается в процентах от максимально допустимого. Самым частым

выбором при проведении полевых работ является. Вибраторы Nomad 65 Neo согласно техническим характеристикам имеют частоту выхода на максимальную мощность = 5.47 Гц (при). Ориентируясь на это, было рассмотрено два варианта частоты выхода на максимальное усилие f_x .

Первый «щадящий» вариант $f_x = 7$ Гц, т.к. при работе со стандартными линейными свип-сигналами (5-100 Гц) полное усилие в районе 5 Гц в реальности никогда не достигалось из-за краевых заглаживающих окон. При выборе $f_x = 7$ Гц аналитическая зависимость амплитуды усилия вибратора (формула 9) для задания НЧ свип-сигнала показана на Рисунке 8; синим показана амплитуда для, оранжевым – для и; вертикальные линии показывают частоты, на которых проводилась генерация монохромных сигналов. Более подробно параметры монохромных воздействий приведены в Таблице 1.



Рисунок 8 - Аналитическая зависимость усилия вибратора для f_x = 7 Гц, синим – для максимального усилия 70%, оранжевым – 60 и 75%.

	-	-	-		-
Тест, №	Этап	Усилие, %	F , Гц	Длина свип- сигнала t_k , с	Тэйперинг свип-сигнала, %
1		60			
2	1	65	10 Гц	10	5
3		70			
4	2	60	7 Гц	10	5

Таблица 1 - Параметры возбуждения монохромных сигналов $f_x = 7$ Гц

5		65			
6		70			
7		45			
8	3	51	6 Гц	10	5
9		55			
10		32			
11	4	36	5 Гц	10	5
12		38			
13		19			
14	5	23	4 Гц	10	5
15		25			
16		10			
17	6	13	3 Гц	10	5
18		15			

Второй вариант $f_x = 5.5$ Гц соответствует паспортному значению частоты выхода на максимальное усилие. Аналитическая зависимость амплитуды усилия вибратора (формула 9) для задания НЧ свип-сигнала показана на Рисунке 9; синим показана амплитуда для , оранжевым – для и ; вертикальные линии показывают частоты, на которых проводилась генерация монохромных сигналов. Более подробно параметры монохромных воздействий приведены в Таблице 2.



Рисунок 9 - Аналитическая зависимость усилия вибратора для f_x = 5.5 Гц, синим – для максимального усилия 70%, оранжевым – 60 и 75%.

Тест, №	Этап	Усилие, %	f, Гц	Длина свип- сигнала <i>t_k</i> , с	Тэйперинг свип-сигнала, %	
16		10				
17	6	13	3 Гц	10	5	
18		15				
19		60				
20	7	65	6 Гц	10	5	
21		70				
22		52				
23	8	57	5 Гц	10	5	
24		62				
25		33				
26	9	37	4 Гц	10	5	
27		39				
28		18				
29	10	20	3 Гц	10	5	
30		22				

Таблица 2 - Параметры возбуждения монохромных сигналов $f_x = 5.5 \ \Gamma$ ц

По результатам тестирования были получены записи акселерометров на двух плитах вибраторов (опорной плита, реакционная масса) и их взвешенную сумму (усилие на грунт). Основной метрикой качества возбуждения считался средний уровень нелинейных искажений (average distortion). Результаты расчета уровня нелинейных искажений для монохроматических сигналов с параметрами из Таблицы 1 приведены на Рисунке 10, для монохроматических сигналов с сигналов с параметрами из Таблицы 2 –на Рисунке 11.



Рисунок 10 - График изменения average distortion от параметров монохроматического сигнала из Таблицы 1.



Рисунок 11 - График изменения average distortion от параметров монохроматического сигнала из Таблицы 2.

По графикам видно, что усилие вибратора не влияет на уровень нелинейных искажений для частот более 5 Гц, что совпадает с параметрами технического паспорта установок Nomad 65Neo с указанной частотой выхода на максимальное усилие $f_x = 5.4$ Гц. Для частот 3-5 Гц усилие вибратора оказывается обратно пропорционально уровню нелинейных искажений, что противоречит общепринятой практике проведения вибрационных сейсморазведочных работ –снижать усилие вибратора при возрастании уровня нелинейных искажений.

Дополнительно была проверена гипотеза 0 возможном влиянии уплотнения при последовательном возбуждении грунта сигналов с возрастающим усилием на одной точке. В этом случае монохромные сигналы генерировались в обратном порядке – от больших частот к меньшим. По результатам этих тестов гипотеза об обратной зависимости усилия вибратора и уровня нелинейных помех на частотах 3-5 Гц была подтверждена.

Основным результатом анализа становится рекомендация генерировать свип-сигналы с как можно большим усилием на низких частотах, т.к. оказалось, что низкие частоты отрабатываются лучше при повышении усилия вибратора (рисунки 10, 11). Тогда при генерации НЧ свип-сигнала рекомендуется

сместить частоту выхода на максимальное усилие f_x в сторону низких частот. Для этого предлагается для любого максимального усилия, выбранного для работы в рабочем интервале частот (обычно 70 %), в области низких частот выходить на максимальную мощность по кривой, соответствующей максимальному усилию =100 %. За f_x тогда берется частота, на которой эта кривая достигает выбранного уровня (например, 70 %). Тогда частоту выхода на максимальную мощность НЧ свип-сигнала можно определить по формуле:

> (14) спортна

где — выбранное для съемки максимальное усилие вибратора, — паспортная частота выхода на максимальную мощность для =100 % (для Nomad 65 Neo - это 5.4 Гц). Значения f_x для разных выбранных для виброисточника Nomad 65 Neo приведены в Таблице 3.

Таблица 3 - Рекомендуемая частота выхода на заданную максимальную мощность для Nomad 65 Neo в зависимости от

5.4 Гц	100%
4.82 Гц	80%
4.67 Гц	75%
4.51 Гц	70%
4.35 Гц	65%
4.18 Гц	60%

Кроме повышения качества генерируемых НЧ свип-сигналов, смещение в сторону меньших значений приводит к уменьшению общей длительности свип-сигналов. Общая энергия НЧ свип-сигнала 3-100 Гц (), длительностью 16 сек и =5.5Гц (по тех. паспорту) будет эквивалентна сигналу длительностью 15.2 сек и =4.5Гц (согласно рекомендациям). Это соответствует сокращению времени проведения полевых работ на 5%.

ФАЗА 2. На втором этапе было проведено тестирование НЧ свипсигналов для проверки эффективности возбуждения низких частот в целевых сигналах. Тестирование включало: –отработка одного пункта возбуждения (ПВ) с набором НЧ свип-сигналов для оценки возможности получения исходных данных при различных параметрах НЧ свип-сигналов;

-отработка площади (40 ПВ) с одним НЧ свип-сигналом для оценки возможности получения суммированного разреза.

Перебор параметров возбуждения НЧ свип-сигналов осуществляется по программе в Таблице 4 (все приводимые пилотные свип-сигналы проходили проверку возможности их генерации в специализированном ПО от производителя виброисточника):

		Усилие	$f_{\scriptscriptstyle H},$	f_x ,	f_k ,	Длина свип	Тэйперинг -
Тест, Л	⊵Этап	прижима	Γπ	Гп	Гп	сигнала, с	свип-сигнала
		%				,	[нач., кон.] м
10		70	3	6.7	100	14	640, 640
11		70	3	5.5	100	14	640, 640
12		70	3	8	100	14	640, 640
13	4	70	3	5.5	100	18	720, 720
14		70	3	6.7	100	12	480, 480
15		70	3	5.5	100	12	480, 480
16	5	70	4	5.5	100	12	480, 480
17	5	70	4	6	100	18	720, 720
18	6	70	5	7	100	18	720, 720
19	7	70	3	9	00	14	640, 640

Таблица 4 - Перебор параметров возбуждения НЧ свип-сигналов

Далее был проведен анализ волнового поля, зарегистрированного приемной расстановкой. На Рисунке 12 приведено сравнение сейсмограмм для ближней линии приема к источнику, слева – данные линейного свип-сигнала 5-100 Гц, справа – данные НЧ свип-сигнала 3-100 Гц. Низкие частоты дают наибольший вклад в поверхностные волны, но визуально также отмечается меньший уровень корреляционных шумов перед первыми вступлениями у НЧ свип-сигнала. Такой эффект можно объяснить в том числе повышением разрешенности импульса Клаудера у НЧ свип-сигнала за счет расширения спектра в область низких частот (Рисунок 13) [Чернышов и др., 2024].



Рисунок 12 - Сейсмограммы одной приемной линии, слева – для линейного свипсигнала 5-100 Гц, справа для НЧ свип-сигнала 3-100 Гц



Рисунок 13 - Импульс Клаудера для сигналов усилия на грунт (GF): синим – при генерации линейного свип-сигнала 5-100 Гц, оранжевым – при генерации НЧ свип-сигнала 3-100 Гц.

Сравнение производилось в шести полосах частот 0-4-5-6-7-8-9 Гц, см. Рисунок 14. Наличие низких частот в волновом поле 0-4 Гц для свип-сигналов с начальной частотой 3 Гц показывает принципиальную возможность генерации и регистрации сигналов на таких частотах (Рисунок 14, вверху). Для свипсигналов с начальной частотой 5 Гц сигнал в этой полосе частот отсутствует (Рисунок 14, внизу). Результаты показывают возможность расширения полосы частот в сейсморазведочных данных при использовании НЧ свип-сигналов, рассчитанных предложенным способом. Это будет давать прирост разрешающей способности разрезов, а также наличие низких частот будет важным при проведении полноволновой инверсии (FWI). Хорошо видно снижение уровня корреляционных помех перед первыми вступлениями на коррелограммах с НЧ свип-сигналом (Рисунок 14, внизу).



Рисунок 14 – Коррелограммы в разных частотных диапазонах: вверху – НЧ свип-сигнала 3-100 Гц, 14 сек, внизу – линейного свип-сигнала 5-100 Гц, 12 сек.

Наличие отраженной волны в данных с НЧ свип-сигналом будет показано при обработке данных для части площади (40 ПВ). Работы были проведены дважды с использованием линейного свип-сигнала 5-100 Гц (длительностью 12 с) и НЧ свип-сигнала 3-100 Гц с параметрами:

Для начала выполнялась проверка синфазности работы вибраторов в группе при генерации низких частот. На Рисунке 15 изображены совмещенные сигналы усилия на грунт (GF) для пяти вибраторов в группе: вверху – сами сигналы усилия на грунт, внизу – их фазовые спектры. Видно, что проблем с синфазностью разных вибраторов в группе на низких частотах не наблюдается, фазовые спектры совпадают.



Рисунок 15 - Совмещенные сигналы усилия на грунт (GF) для всех вибраторов в группе: вверху – сигналы, внизу – фазовые спектры.

Следующим этапом было построение сейсмического куба по данным с 40ПВ, полученным с использованием НЧ свип-сигнала и линейного свипсигнала 5-100 Гц, обычно используемого при проведении производственных работ. Целью было подтверждение наличия низких частот в полезном сигнале – отраженные волны и волны в первых вступлениях. Особое внимание уделялось сохранению низких частот на всех этапах обработки. Кинематические и статические поправки не столь важны для решения поставленной задачи, поэтому допускалось применение трим-статики для увеличения когерентности разрезов. Составлен следующий граф экспресс кинематической обработки, который далее применялся к данным с НЧ и линейным свип-сигналом с одинаковыми параметрами:

- 1. Импорт коррелограмм.
- 2. Применение статики за рельеф, скорость замещения 1700 м/с.
- 3. Компенсация сферического расхождения.
- 4. Подавление поверхностных волн (SWANA).
- 5. Подавление выбросов (спайков).
- 6. Подавление линейных волн помех (фильтр в области Радона).

7. Переход к минимально-фазовому виду сигнала (по пилотному свипсигналу).

8. Поверхностно-согласованная деконволюция сжатия.

9. Поверхностно-согласованная коррекция амплитуд.

10. Автоматическая коррекция статических поправок.

11. Расчет и применение трим-статики.

12. Построение финального разреза.

Финальный разрез с инлайна №113 приводится на рисунке 16, слева для линейного свип-сигнала 5-100 Гц, справа для НЧ свип-сигнала 3-100 Гц. Видно, что разрез слева имеет меньший уровень случайного шума, это связано с большей амплитудой поверхностной волны которую не удалось полностью подавить в рамках упрощенного графа экспресс обработки. Невооруженным

глазом можно отметить наличие низких частот отраженных волн на разрезе справа, что подтверждается амплитудными спектрами разрезов, см. рисунок 17.



Рисунок 16 - Финальные разрезы: слева – линейный свип, справа – НЧ свип.



Рисунок 17 - Амплитудные спектры разрезов на Рис. 16: красным – линейный свип-сигнал, синим – НЧ свип-сигнал.

Для анализа наличия низких частот к финальным разрезам был применен полосовой фильтр с параметрами 0-3-5-7 Гц, результат фильтрации показан на Рисунке 18. Низкочастотные оси синфазности, остающиеся после фильтрации совпадают с горизонтами до фильтрации. Таким образом, показано наличие низких частот в полезных сигналах при обработке данных НЧ свип-сигнала.



Рисунок 18 - Финальные разрезы после полосовой фильтрации 0-3-5-7 Гц: слева – линейный свип, справа – НЧ свип.

Такой же анализ был проведен по данным до суммирования. На рисунке 19 приведены сейсмограммы в сортировке общей точки возбуждения (ОТВ). Аналогично разрезам была применена полосовая фильтрация с параметрами 0-3-5-9 Гц, в волновом поле выделяются отраженные волны на низких частотах при использовании НЧ свип-сигнала (Рисунок 20).





Рисунок 19 - Финальные сейсмограммы: сверху – линейный свип-сигнал, снизу – НЧ свип-сигнал.



Рисунок 20 - Финальные сейсмограммы после полосовой фильтрации 0-3-5-9 Гц: сверху – линейный свип-сигнал, снизу – НЧ свип-сигнал.

Отдельно проведен анализ влияния свип-сигнала на область первых вступлений исходных данных (коррелограммам), на предмет устойчивости процедуры снятия времен первых вступлений. После ввода геометрии к коррелограммам применялся оператор перехода к минимально-фазовому импульсу, далее применялся алгоритм автоматического снятия времен первых вступлений «по срыву» с использованием нейронных сетей [Loginov et al., 2019; Митрофанов и др., 2024; Чернышов и др., 2024]. На рисунке 21 показана коррелограмма для линейного свип-сигнала (вверху) и НЧ свип-сигнала (внизу), красные точки – времена, снятые с коррелограммы для линейного свип-сигнала.



Рисунок 21 – Коррелограммы со снятыми временами первых вступлений: для линейного свип-сигнала (вверху), для НЧ свип-сигнала, красные точки –времена, снятые с коррелограммы для линейного свип-сигнала, синие точки – для НЧ свип-сигнала

Видно, что корреляционные шумы, присутствующие в коррелограмме линейного свип-сигнала, периодически приводят к «перескоку» снятых времен

на сигнал корреляционной помехи при применении автоматических алгоритмов снятия времен первых вступлений.

По результатам анализа данных ОМР можно сделать выводы:

1. Предложенный в главе 2.2 алгоритм построения НЧ свип-сигналов является корректным и реализуемым для современных виброисточников на примере источника NOMAD 65 Neo.

2. Показано, что в отличие от стандартного линейного свип-сигнала 5-100 Гц использование НЧ свип-сигнала 3-100 Гц позволяет получить низкие частоты (3-6 Гц) во всех наблюдаемых волнах – отраженных, поверхностных, волнах первых вступлений. Это позволит повысить разрешенность разрезов, точность результатов методов инверсии волнового поля, повысить качество снятия первых вступлений для изучения ВЧР.

3. Для низких частот усилие вибратора обратно пропорционально уровню нелинейных искажений. На основе этого предложен подход к генерации НЧ свип-сигнала с выходом на рабочий уровень по кривой максимального усилия (A_max=100 %), что позволяет сместить частоту выхода на максимальное усилие f_x в сторону низких частот в соответствии с формулой (14). Кроме повышения качества генерируемых НЧ свипсигналов это позволит уменьшить длительность НЧ свип-сигналов для заданного интервала частот. Для рассмотренного конкретного случая удается сгенерировать эквивалентный НЧ свип-сигнал, который будет короче на 5 %, что приведет к пропорциональному сокращению длительности полевой съемки.

2.4. Обработка виброграмм

В начале главы была приведена теория стандартного подхода к получению коррелограмм путем корреляция трасс виброграммы с пилотным свип-сигналом, см. формулы 1-7. Там же было показано, что несоответствие

реального зондирующего сигнала (наличие в нем гармноник) пилотному свипсигналу приводит к появлению корреляционных и гармонических помех.

Наиболее распространенным способом определения сигнала, приближенного к истинному является сигнал усилия виброисточника на грунт (Ground Force) [Wei, 2017]. Для этого используются записи акселерометров, установленных на двух плитах вибрационного источника: на реакционной массе и на опорной плите. На рисунке 22 приведено схематичное изображение гидравлической вибрационной установки.



Рисунок 22 – Схематичное изображение устройства гидравлической вибрационной установки [Wei, 2017].

Использование сигнала усилия на грунт используется для оценки качества возбуждаемого сигнала в предположении, что сигнал в среде в дальней зоне источника будет пропорционален силе, прикладываемой в источнике (). Сигнал усилия на грунт (GF) выражается как взвешенная сумма ускорений для двух плит, участвующих в генерации сигнала [Wei, 2017]:

где - масса реакционной массы, - запись ускорения реакционной массы, - масса опорной плиты, - запись ускорения опорной плиты.

(16)

Такой сигнал содержит гармонические моды и представляет собой сигнал, генерируемый виброисточником, но не учитывает сцепление опорной плиты с грунтом. На рисунке 23, слева показана спектрограмма сигнала усилия на грунт, а на рисунке 23, в середине – реальная виброграмма для того же воздействия. Видно, что сигнал усилия на грунт не является истинным зондирующим сигналом в среде, но приближен к нему больше, чем пилотный свип-сигнал (Рисунок 1, слева).

Однако хорошее знание зондирующего сигнала не улучшает качество корреляционной обработки виброграмм. Если заменить в формуле 7 комплексно-сопряженный спектр пилотного свип-сигнала на истинный спектр с гармониками, то результат будет осложнен перекрестной корреляцией разных мод сигнала [Денисов, 2020]:

На рисунке 23, справа на спректрограмме коррелограммы видно, что гармонические колебания, присутствующие в сигнале GF, попадают на положительные времена коррелограммы, что значительно «зашумляет» запись целиком.

(17)



Рисунок 23 - Спектрограммы трасс в процедуре корреляции, слева - сигнала GF, в центре – виброграммы, справа - коррелограммы, белым – целевая область

Альтернативным способом расчета коррелограммы по виброграмме является детерминистическая деконволюция. В отличие от корреляции при деконволюции спектры делятся [Yilmaz, 2001]:

Деконволюция позволяет использовать сигнал усилия на грунт вместо пилотного, так как в отличии от корреляции гармоники удаляются из сигнала при условии, что сигнал соответствует истинному.

(18)

В работе впервые проведен анализ влияния деконволюции при обработке виброграмм на уменьшение корреляционных шумов в области первых вступлений для повышения качества снятия первых вступлений.

В ходе тестирования были рассмотрены следующие варианты получения коррелограмм с использованием:

- корреляция с пилотным свип-сигналом;

- деконволюция с пилотного свип-сигналом;

- деконволюция со свип-сигналом, приближенным к фактическому, который рассчитывался по методу [Фиников, Шалашников, 2021];

- деконволюция с сигналом усилия на грунт (GF).

Далее ко всем коррелограммам применялась полосовая фильтрация в частотном диапазоне пилотного свип-сигнала. Полученные коррелограммы показаны на рисунках 24, 25. В качестве метрик качества использовались суммы амплитуд в области корреляционных шумов до первых вступлений и на поздних временах трасс ближних удалений. Для всех результатов деконволюции проводилось численное сравнение, путем расчета отношения к соответствующим метрикам для корреляции с пилотным свип-сигналом (использовалось в качестве базовой метрики).

Лучший результат получен для деконволюции с сигналом GF, который позволил снизить уровень корреляционных шумов в 3 раза (Рисунок 24). Деконволюция с пилотным свип-сигналом понижает уровень корреляционных шумов в 1.1 раз (Рисунок 25), деконволюция с рассчитанным свип-сигналом – в 2 раза (Рисунок 25).



Рисунок 24 – Коррелограммы, полученные с помощью корреляции: слева – с пилотным свип-сигналом, справа – с сигналом GF, помечены области прослеживания корреляционных шумов до первых вступлений и случайного шума на ближних удалениях.



Рисунок 25 – Коррелограммы, полученные с помощью деконволюции: слева – с пилотным свип-сигналом, справа – с рассчитанным свип-сигналом; помечены области прослеживания корреляционных шумов до первых вступлений и случайного шума на ближних удалениях.

Подавление гармонически шумов

Подавление гармонических шумов особо актуально для вибросейсмических высокопроизводительных работ. Метод slip-sweep предполагает одновременную работу источников на нескольких ПВ с некоторой задержкой (slip-time). Величина задержки, подбираемая как параметр источника в рамках опытно-методических работ (OMP), прямо пропорциональна производительности работ. Наличие методов эффективного подавления такой помехи может позволит уменьшить время задержки (sliptime) и повысить повысить производительность вибросейсмических работ.

Обзор методов подавления гармонических шумов приведен в Главе 1. На реальных данных было проведено тестирование двух самых простых методов, которые не требуют дополнительной информации кроме знания пилотного свип-сигнала: «следящая фильтрация» виброграмм [Гафаров, 2012; Долгих и др., 2019], расчет модели гармонического шума и адаптивное вычитание [Денисов, 2020].

«Следящая фильтрация» заключается в применении к виброграмме серии полосовых фильтров с переменной полосой фильтрации во времени. Пример виброграммы метода slip-sweep и ее спектрограмма (преобразование Габора) показано на рисунке 26, вверху. Результатом является фильтрация данных вне целевой полосы (показана на Рисунке 1). На рисунке 26, внизу показан результат фильтрации к виброграмме метода slip-sweep (для одной трассы). Видно, что вторичные возбуждения на виброграмме хорошо фильтруются, но остается гармоника от второго возбуждения, которая находится в зоне интерференции с основной модой свип-сигнала первого возбуждения (синяя линия).

Эффект процедуры «следящая фильтрации» аналогичен действию процедуры корреляции с пилотным свип-сигналом, которая также соответсвует переменной по времени фильтрации (глава 2.1, Рисунки 1, 2). Этот вывод подтверждается и результатами тестирования на сейсмограммах slip-sweep. На

рисунке 27 приводятся спектрограммы трасс коррелограмм до и после «следящей фильтрации». Как видно в целевой полосе времен 0-6 сек спектры идентичны, во временной области разница отсутствует. Это позволяет сделать вывод о том, что эффект «следящей фильтрации» есть на уровне виброграмм, но отсутствует на коррелограммах.



Рисунок 26 - Виброграммы с спектрограммами трасс, а – до, б – после «следящей фильтрации».



Рисунок 27 - Спектрограммы трасс коррелограмм, слева – до фильтрации, справа – после фильтрации виброграммы.

Для подавления гармонического шума был программно реализован метод расчета модели гармонического [Денисов, 2020]. Кратко опишем основные шаги этого алгоритма:

1) генерация свип-сигнала гармонических колебаний;

2) расчет функции взаимной корреляции (ФВК) между пилотным свип-сигналом и свип-сигналом гармоники с шага 1;

3) расчет полной коррелограммы по данным;

4) свертка полной коррелограммы с ФВК свип-сигналов с шага 2;

5) адаптивное вычитание полученной модели гармонического шума из исходной коррелограммы.

Тестирование проводилось на данных с длиной свип-сигнала 30 сек, задержкой (slip time) между возбуждениями 10 сек (30 %). Спектрограмма трассы получаемой модели шума приведена на рисунке 28, для сравнения приводится спектрограмма трассы исходной коррелограммы, осложненной гармоническим шумом от второго возбуждения.



Рисунок 28 - Спектрограммы трасс, слева – коррелограммы до фильтрации, справа – модели гармонического шума.

На Рисунке 29 показан результат («после фильтрации») адаптивного вычитания модели гармонического шума из коррелограммы, стрелочками показана область прослеживания шума. Для оценки эффективности фильтрации также приводится «эталонная» коррелограмма, полученная из данных с временем задержки (slip time) 15 сек (50%), (см. Рисунок 29, «без помехи»), т.к. для нее гармонические шумы уже не наблюдаются. На рисунке видно, что на начальных коррелограммах (Рисунок 29, «до фильтрации») видны гармонические помехи – показаны зелеными стрелочками. После фильтрации коррелограмм с короткой задержкой 10 сек (30%) гармонические помехи подавляются (Рисунок 29, «после фильтрации»). Их уровень соответствует уровню помех на «эталонной» коррелограмме (см. Рисунок 29, «без помехи»).



Рисунок 29 - Коррелограммы, до фильтрации sliptime = 30%, после фильтрации гармонических шумов sliptime = 30%, без гармонических шумов с увеличенным sliptime = 50%, стрелками указываются области прослеживания гармонических шумов.

Выводы

Были протестированы различные подходы к обработке виброграмм и проведена оценка их эффективности по результатам применения к реальным данным.

Сделаны следующие выводы:

1. Корреляция виброграмм с пилотным свип-сигналом обладает фильтрующими свойствами, эквивалентными переменной по времени «следящая фильтрацией» виброграмм.

2. Деконволюция виброграмм с использованием сигнала GF позволяет понизить уровень корреляционных помех.

3. Гармонические помехи, характерные для выскопроизводительных вибросейсмических работ (технология slip-sweep), с высокой эффективностью подавляются методом расчета модели гармонического шума, которые не требуют дополнительной информации кроме пилотного свип-сигнала.

4. Совокупность рассмотренных алгоритмов, входящих в разработанную методику построения скоростных моделей среды, повышает точность снятия времен первых вступлений, за счет понижения уровня корреляционного и гармонического шума.

Глава 3. АЛГОРИТМ ЛУЧЕВОЙ ТОМОГРАФИИ С ПОДБОРОМ ОПТИМАЛЬНОЙ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ АНОМАЛИЙ

В данной главе приводится модификация алгоритма лучевой сейсмической томографии с возможностью выбора параметризации модели. Верификация алгоритма приводится на синтетических и реальных данных, включающих 2D/3D системы наблюдения и модели, характерные для инженерных и разведочных задач.

3.1. Описание алгоритма

Используется стандартная постановка лучевой томографии [Zelt, 2021; Нолет, 1990]. В истинной скоростной модели времена пробега волн от источника в приемник представляется в виде интеграла вдоль луча:

, (19) где – время пробега волны из источника в приемник, – траектория луча, – истинная скоростная модель, – длина сегмента луча.

Зададимся некоторой начальной скоростной моделью. Тогда времена пробега волн в начальной модели можно найти аналогично:

, (20) где – время пробега волны из источника в приемник а начальной модели, – траектория луча в начальной скоростной модели .

Пусть начальная скоростная модель близка к истинной, т.е., а аномалии малы. Тогда можно линеаризовать задачу расчета времен пробега в истинной модели:

(21)

Это выражение можно переписать в виде:

, (22) где – невязка между измеренными временами пробега и временами , рассчитанными для начальной скоростной модели .

Дискретизация томографической инверсии заключается в разбиении рассматриваемого пространства скоростной модели на ячейки, что позволяет 62 перейти от интегралов к суммам. Для каждой ячейки подбирается свое значение аномалии скорости . Тогда формула (22) принимает вид системы линейных уравнений:

, (23) где – вектор временных невязок времен с элементами (– число лучей для разных пар источник-приемник), – вектор параметров модели с элементами (– число пространственных ячеек, в которых подбираются аномалии скорости), – томографическая матрица с элементами , – длина сегмента -го луча через -ю томографическую ячейку.

Альтернативный вывод линеаризованной томографической задачи основан на параметризации модели не скоростью, а медленностью распространения сейсмических волн [Zelt, 2021]:

, (24) где – начальная модель медленности распространения волн, – аномалия медленности.

После дискретизации формула (24) принимает вид:

. (25) где – вектор параметров модели с элементами (– число пространственных ячеек, в которых подбираются аномалии медленности), – томографическая матрица с элементами, – длина сегмента -го луча через -ю томографическую ячейку.

Заметим, что обе линейные систем (22 и 25) могут быть записаны в общем виде:

где – новая параметризация модели, – диагональная весовая матрица с диагональными элементами:

(26)

(27) Использование матриц соотвествует масштабированию пространства параметров модели, что является частной формой правого предобусловливания (Luo et al., 2015). В данном случае для масштабирования параметра модели в *n*й ячейке используются значения начальной скоростной модели в этой же ячейке в разной степени. Так как в начальной модели скорость растет с

глубиной, то данное взвешивание влияет на чувствительность аномалий на разных глубинах к данным (невязкам времен).

Тогда приведенные выше две параметризации вектора модельных параметров [Zelt, 2021]:

параметризация скоростью (), что соответствует весовой матрице в формуле (27) с ;

 параметризация медленностью (), что соответствует весовой матрице в формуле (27) с .

Регуляризация решения достигается путем дополнения томографической матрицы матрицами демпинга и сглаживания [Rawlingson et al, 2010]:

(28) где *E* – единичная диагональная матрица демпинга, *D* – оператор дискретной первой производной для соседних элементов модели, – регуляризирующие параметры демпинга и сглаживания, для удобства не вводится новой переменной для обозначения томографической матрицы с регуляризирующими дополнениями.

Алгоритм лучевой томографии для построения 2D/3D скоростной модели включает следующие этапы:

1. Построение начальной скоростной модели. Для задания начальной скорости используются априорные данные (электротомография, скважинные геологическое картирование), которые измерения, дальше уточняются решением одномерной обратной задачи – подбор сводного годографа времен первых вступлений от удаления источник-приемник [Бондарев, 2009]. Чаще всего в качестве начальной задается модель с линейным ростом скорости с глубиной. Лучевая томография обновляет скоростную модель только в области с хорошим покрытием трассированных лучей в начальной модели. Поэтому рекомендуется завысить градиент скорости, чтобы лучи немного

рефрагированных волн в начальной модели проникали чуть глубже, чем глубина проникновения лучей в реальной модели.

2. Решение прямой задачи. Для начально модели строится регулярная вычислительная сетка, на которой решается прямая задача – рассчитываются времена прихода и лучевые траектории волн первых вступлений. Для расчета времен используется параллельный алгоритм численного решения уравнения эйконала [Nikitin et al., 2018] с последующим построением лучей для пары источник-приемник [Сердюков, Протасов, 2012]. Это позволяет найти вектор невязок времен в формуле (28). Шаг ячейки вычислительной сетки рекомендуется задавать в несколько раз меньше шага томографической сетки (см. пункт 3).

3. Построение томографической матрицы. Задается регулярная томографическая сетка, для которой решается обратная томографическая задача. Согласно формуле 25 элементами матрицы являются длины сегментов лучей в каждой томографической ячейке. Для других параметризаций, см. формулу (27), в элементах матрицы будут еще использованы весовые параметры. Размер томографической ячейки задается пользователем должен быть не меньше шага по источникам/приемникам в системе наблюдения.

4. Регуляризация томографической задачи выполняется дополнением матрицы блоками, отвечающими за гладкость и амплитуду аномалий [Rawlinson et al, 2010], см. формулу (28). Веса блоков подбираются пользователем, с увеличением значений растет гладкость искомых параметров модели, а также уменьшается их амплитуда.

5. Решение обратной томографической задачи. Для этого решается система линейных алгебраических уравнений (28) методом LSQR.

6. Результирующая модель получается суммированием значений начальной скоростной модели и найденных аномалий (параметров модели).

7. Так как томографическая задача решается в линеаризованной постановке, то алгоритм необходимо повторить, взяв обновленную модель в качестве начальной. Для этого необходимо пересчитать скоростную модель с

грубой томографической сетки на детальную расчетную, используя линейную интерполяцию. Затем алгоритм повторяется с пункта 2.

3.2. Тестирование и выбор параметризации модели

Для всех синтетических тестов в этом разделе использовалось 10 итераций линеаризованной томографической инверсий. Оптимальные регуляризирующие параметры и в уравнении (28) подбираются с использованием следующих критериев: минимальные невязки времени пробега и скорости, а также визуальная оценка устойчивости решения (отсутствие локальных высокоамплитудных аномалий в восстановленных возмущениях модели).

Проведено сравнение трех разных параметризаций модели (формулы (26) и (27)). При использовании разных параметризаций для одной и той же модели регуляризирующие параметры и идентичны.

Кратко рассмотрим стратегию построения начальной модели, которая имеет существенное влияние на результат томографической инверсии. Сначала задается линейный градиент скорости в модели исходя из кажущихся скоростей среднего (для всего профиля наблюдений) годографа. Затем выполняется одна итерация томографической инверсии, вычисляется среднее значение аномалий скорости на каждой глубине и вычитается из начальной модели. Для заданного удаления источник-приемник максимальная глубина проникновения преломленного луча увеличивается с увеличением градиента скорости.

Для первого синтетического теста использовалась истинная скоростная модель типа «шахматной доски» [Leveque, 1993]. Скорость в модели растет с глубиной по закону м/с (м). На эту градиентную модель наложены аномалии аномалиями скорости в виде «шахматной доски», см Рисунок 30а. Амплитуды аномалий составляют +/– 10 % от абсолютного значения скорости на данной глубине. Взяты две характерные области, для которых аномалии различаются по размеру:

- приповерхностная область с размерами аномалий 2х2,5 м;
- глубинная область с размерами аномалий 15x10 м.

Топография рельефа и система наблюдений типичны для инженерной сейсморазведки: расстояние между источниками 5 м, расстояние между приемниками 1 м, длина профиля 175 м. Приемники и источники показаны зелеными точками и красными звездочками соответственно на Рисунке 30а. Расчет синтетических данных был проведен для точной модели (Рисунок 30а) тем же алгоритмом численного решения уравнения эйконала. Размер вычислительной сетки для расчета времен и лучей составляет 0.1х0.2 м.

Размер томографической прямоугольной сетки составляет 1х2 м, параметры демпинга и сглаживания 15. На Рисунке 35 приведены результаты томографической инверсии для нескольких параметризаций модели:

- параметризация скоростью () на Рисунке 30б;
- параметризация медленностью () на Рисунке 30в;
- промежуточная параметризация () на Рисунке 30г.



Рисунок 30 – Тест «шахматной доски» для сравнения результатов томографической инверсий для разных параметризаций модели: (а) истинные аномалии скорости, (б) восстановленные аномалии для параметризации скорости, (в) для параметризации медленностью (), (г) для новой параметризации (); черная рамка – приповерхностная область, красная рамка – глубинная область

Из рисунка видно, что параметризация скорости () дает лучшие результаты для приповерхностной области (лучше восстанавливаются маленькие прямоугольники), но качество инверсии ухудшается в более глубинной области модели. Параметризация медленности () дает лучшие результаты для более глубинной области, но качество инверсии ухудшается в приповерхностной области. Новая промежуточная параметризация () показывает хорошее разрешение как для приповерхностной, так и для более глубинной области (красные стрелки показывают аномалию скорости на большей глубине для сравнения).

Для количественного сравнения результатов томографической инверсии для приповерхностной и глубинной области вычисляется вторая норма абсолютной невязки между истинной и восстановленной скоростными моделями:

(29)

где отдельно рассмотрена ошибка для приповерхностной области (показана черной рамкой на Рисунке 30а) и для приповерхностной области (показана красной рамкой на Рисунке 30а); – значения истинной скоростной модели в ячейках, которые лежат в области ; – результаты томографической инверсии в ячейках, которые лежат в области .

Соответствующие ошибки для трех параметризаций показаны в Таблице 5. Результирующие невязки времен прихода составили менее 1 мс для всех параметризаций. Из таблицы видно, что новая параметризация () дает оптимальный результат для модели целиком. Для нее метрика оказывается очень близка к параметризации скоростью, а метрика оказывается очень близка к параметризации медленностью для более глубинной области.

Таким образом, параметризация скорости может быть использована, если заранее известно, что аномалии скоростной модели присутствуют только на малых глубинах. Параметризация медленности может быть использована, если аномалии скоростной модели присутствуют только в глубинной части. Новая параметризация показала оптимальный результат на всех глубинах.

Таблица 5 – Вторая норма абсолютной погрешности (м/с) определения скоростей в разных областях модели

Параметризация	для приповерхностной	для глубиной
модели	области (*10 ⁴)	области (*10 ⁴)
Скорость ()	20.7	84.3
Медленность ()	21.7	79.9
Новая ()	20.9	79.6

Для второго теста использовалась модель шахматной доски co сглаженными аномалиями (Рисунок 31). Система наблюдения, фоновый линейный градиент скорости и размер аномалий такие же, как и в предыдущем тесте. На Рисунке 32 приведены срезы скоростной модели результатов томографической инверсии на двух глубинах (7,5 и 15 м), которые показаны черными горизонтальными линиями на Рисунке 31. На Рисунке 32 зеленая линия показывает истинные значения скорости, восстановленные скорости по результатам томографии показаны синей линией для параметризации, красной – для, фиолетовой – для. Видно, что параметризация скоростью и новая работают лучше всего на небольшой глубине (Рисунок 32а); параметризация медленностью и новая работаю лучше на большей глубине (Рисунок 32б). Дополнительно проведен тест для томографии с чередованием параметризаций скоростью и медленностью по итерациям; результаты показаны оранжевой линией на Рисунке 32, результат оказался хуже.



Рисунок 31 - Истинная скоростная модель со сглаженными аномалиями, два уровня глубины для сравнения результатов томографической инверсии показаны черными линиями (Рисунок 32).



Рисунок 32 - Срезы скоростей результатов томографической инверсии на двух уровнях глубины (см. рисунок 31): 7,5 м (а) и 15 м (б); зеленая линия показывает истинные вариации скорости, результаты инверсии для различных параметризаций модели показаны другими цветами.

Развивая идею подбора оптимальной параметризации модели была проведена серия томографических инверсий с более дробным шагом по от 0 до 3. Для сравнения результатов томографии была использована численная метрика среднеквадратической относительной ошибки для двух областей:

(30)

где невязка между значениями истинной скоростной модели и восстановленной скоростной модели берется для приповерхностной области (показана черной рамкой на Рисунке 35а) и для приповерхностной области (показана красной рамкой на Рисунке 35а), – число ячеек в соответствующей области.

На рисунке 33 показана сумма () для разных параметризаций. Видно, что

параметризация действительно лучше стандартных альтернатив (и), но оптимальным параметром является.



Рисунок 33 – Сумма относительной погрешности построения скоростной модели на разных глубинах в зависимости параметризации (о).

Также был проведен дополнительный тест для сравнения томографической инверсии с параметризацией и подхода со взвешиванием томографической матрицы плотностью лучей в томографических ячейках (Рисунок 34). Такое взвешивание направлено на повышение чувствительности алгоритма к ячейкам модели с большей плотностью лучей относительно ячеек с меньшей их плотностью [Нолет, 1990]. Элементы такой весовой матрицы принимают вид:

где – плотность лучей в *i*-й ячейке модели.

Рисунок 34 – Плотность лучей в модели после пятой итерации.

(31)
На рисунке 35 приводится результат пяти итераций томографии с новой параметризацией (Рисунок 35а) и стандартной скоростной параметризацией и взвешиванием плотностью лучей (Рисунок 35б). Новая параметризация дает более хороший результат для приповерхностного слоя: 20.2% против 21.7%, общая метрика также оказывается несколько лучше: 25.4% против 26.5% (формула (30)).



Рисунок 35 – Тест гладкой шахматной доски для сравнения томографических инверсий после: (а) аномалии для параметризации, (б) томография со скоростной параметризацией и взвешиванием плотностью лучей.

Для следующего синтетического теста использовалась модель с аномалией в форме наклонной границы, см. Рисунок 36а. Параметры системы наблюдения: длина сейсмического профиля 78 м, количество приемников 40 (шаг 2 м), количество источников 9 (шаг 4 м). Размер томографической сетки 1х1 м, количество томографических итераций 10.

Выполнены томографические инверсии для четырех параметризаций, результирующие временные невязки менее 0.1 мс. Для количественного сравнения параметризаций вычислена средняя абсолютная ошибка между результирующей и истинной скоростной моделью в окрестности аномалии



(черный контур на Рисунке 36а) [Chernyshov et al., 2022].

Рисунок 36 – Тест с поднятым блоком: (a) истинная скоростная модель, черная рамка – область для оценки невязки по скорости, (б) аномалии скорости по томографической инверсии в новой параметризации

На Рисунке 37 показаны средние абсолютные ошибки подбора скоростей в области, показанной черной рамкой на Рисунке 36а. Показаны результаты для разных параметризаций: синяя линия – параметризация скоростью (), красная – параметризация медленностью (), фиолетовая – новая параметризация (), оранжевая – чередование парамтеризаций скоростью и медленностью. Видно, что новая параметризация имеет минимальную ошибку для рассмотренных параметризаций [Чернышов и др., 2024].



Рисунок 37 - Средняя абсолютная ошибка между истинной моделью скорости и результатами томографической инверсии (черная рамка на Рисунке 41a) на разных итерациях томографии (горизонтальная ось) и различных параметризаций модели (цвет линии) [Chernyshov et al., 2022].

Дальнейшие синтетические тесты включали резкие границы между слоями, локальные аномалии скорости, ориентированные вертикально и горизонтально (Рисунок 38). Параметры системы наблюдения: длина профиля – 78 м, количество приемников – 40 (шаг 2 м), количество источников – 9 (шаг 8 м). Размер томографической сетки 1х1 м, количество томографических итераций – 10. Количественная оценка качества скоростных моделей предыдущим выполнялась аналогично тестам, невязки скорости рассчитывались в области вокруг целевой аномалии, см. Таблицу 6. Общий вывод о преимуществе новой параметризации подтверждается [Chernyshov et al., 2022].

Таблица 6 – Вторая норма абсолютной невязки для скоростной модели в области вокруг аномальных тел для моделей на Рисунке 43.

Параметризация	Модель 1	Модель 2	Модель 3
модели			
Скорость ()	121	247	247
Медленность ()	120	309	309
Новая ()	115	230	230

Вторая норма абсолютной невязки скорости для модели с резкой границей (Рисунок 38а) составили 121, 120, 115, 125. Для модели с вертикальной аномалией (Рисунок 38б) составили 247, 309, 230, 247. Для модели с горизонтальной аномалией (Рисунок 38в) составили 247, 309, 230, 247. Результаты подтверждают вывод о том, что новая параметризация обеспечивает оптимальные результаты из рассматриваемых параметризаций – минимальные или близкие к минимальным невязки скорости для всех тестовых моделей.



Рисунок 38 - Скоростные модели, используемые для синтетических тестов:

(а) Модель 1 – резкий выступ границы, (б) Модель 2 – вертикальная аномалия,
 (в) –горизонтальная аномалия [Chernyshov et al., 2022].

Тестирование на синтетических данных включало слоистую скоростную модель, приближенную к реальному геологическому строению ВЧР Западной Сибири (Рисунок 39). Использовалась профильная 2D система наблюдений, характерная для разведочной сейсмики: шаг по пунктам приема (ПП) – 50 м, шаг по пунктам возбуждения (ПВ) – 50 м, максимальное удаление источник-приемник – 1200 м, длина профиля – 16 км. Модель включает в себя 5 слоев: 1) слой зоны малых скоростей (ЗМС), который неоднороден по латерали с диапазоном скоростей 600-850 м/с, 2) однородный слой с скоростью 900 м/с, 3) однородный слой с скоростью 1200 м/с, 4) слой многолетнемерзлых пород с скоростью 2400 м/с, 5) подстилающий однородный слой со скоростью 1800 м/с, имитирующий инверсию скоростей [Chernyshov et al., 2022].



Рисунок 39 - Истинная скоростная модель, зеленой линией показан рельеф, на котором расположена система наблюдений.

Моделирование годографов первых вступлений (Рисунок 40) производилось с помощью численного решения уравнения эйконала [Никитин и др., 2018], для минимизации погрешности расчета шаг дискретизации модели выбирался много меньше шага рассматриваемой системы наблюдения и составлял - 0.1 м по вертикали, 0.5 м по горизонтали.



Рисунок 40 - Совокупность годографов первых вступлений.

Оптимальные параметры инверсии были подобраны исходя из следующих критериев:

1. Размер томографической ячейки выбирается с учетом расстояния между ПП и ПВ, избегая возникновения «пустых» ячеек, через которые не будут проходить лучи.

2. При отсутствии априорной информации о скоростном разрезе модели распространенным подходом является использование линейного градиента скорости в качестве начальной скоростной модели.

3. Количество итераций считается оптимальным при выходе тренда невязок по времени в зависимости от номера итерации на горизонталь.

4. Параметры сглаживания и демпинга регулируются исходя из построенной скоростной модели. Оптимальные значения выбраны исходя из следующих критериев: гладкость модели (отсутствие высокоамплитудных линейных/локальных аномалий), невязка по времени, невязка скоростной модели.

Инверсия выполнена с параметрами: размер ячейки по X – 60 м, размер ячейки по Z – 10 м, градиент скорости в начальной скоростной модели – 4.2 м/с*м, скорость на нулевой глубине – 400м/с, количество итераций томографии – 5, вес сглаживания по горизонтали – 0.23, по вертикали – 0.09, вес матрицы демпинга – 0.03. Результат инверсии приведен на рисунке 46, черным цветом приведены истинные положения подошвы ЗМС и кровли многолетнемерзлых пород. Для отображения использовался линейный градиент цвета от синего к

красному, визуально можно выделить четыре слоя с положительным вертикальным градиентом скорости.



Рисунок 41 - Результат томографической инверсии, черным цветом – подошва слоя ЗМС и кровля слоя многолетнемерзлых пород в истинной модели, красным – линия изоскорости 1750м/с, зеленым – система наблюдения.

Критерием качества полученной модели служит невязка времен первых вступлений, которая составила 1.5 мс после пятой итерации. Но невязка по времени не является абсолютным критерием качества получаемой модели [Palmer, 2015]. На рисунке 42 приведены графики изменения второй нормы абсолютной невязки моделей с итерациями томографии для двух участков модели – до подошвы слоя ЗМС (Рисунок 42а) и до кровли многолетнемерзлых пород (Рисунок 42б). Такой критерий позволяет провести сравнительную оценку получаемых моделей при подборе оптимальных параметров инверсии.



Рисунок 42 - Графики изменения второй нормы абсолютной невязки скоростной модели, а) для первого слоя истинной модели, б) для глубин до кровли многолетнемерзлых пород.

Хотя гладкая скоростная модель содержит геометрии границ и положение локальных скоростных аномалий, интерпретация полученного разреза затруднена отсутствием границ слоев. А встраивание скоростной модели ВЧР глубинной модели В известных пакетах обработки как часть часто поддерживает только пластовые модели, из-за особенностей алгоритмов моделирования. Для оценки алгоритм конвертации гладкой скоростной модели в слоистую.

Границы слоев в гладкой скоростной модели соответствуют линиям изоскоростей co значениями около арифметического среднего между скоростями в вышележащем и нижележащем слоях [Zelt et al., 2003]. Количество слоев и скорости могут быть получены из априорной информации или при анализе годографов первых вступлений. Подход заключается в переборе значений изоскоростей, определяющих положение границ, минимизировать невязку по времени между снятыми годографами первых вступлений и моделируемыми в слоистой модели.

Так полученная гладкая скоростная модель разбивается на однородные слои со скоростями 600 м/с, 900 м/с, 1200 м/с, 2400 м/с (Рисунок 43). Т.к. перебор скоростных моделей подразумевает большое количество расчетов времен первых вступлений, из всех данных были выбраны 10 ПВ для расчета невязки по времени. Изоскорости для каждой границы подбирались с шагом 20 м/с, невязка по времени для всех ПВ составила 4.1 мс, что соответствует невязке на третьей итерации лучевой томографии [Чернышов и др., 2022].



Рисунок 43 - Результат конвертации гладкой скоростной модели в слоистую с однородными слоями 600 м/с, 900 м/с, 1200 м/с, 2400 м/с [Чернышов и др.,

Далее для трех имеющихся моделей (истинная, гладкая, слоистая) рассчитаны времена прохода вертикального луча от рельефа до кровли мерзлоты в каждой точке профиля (Рисунок 44а) и построены их разности (Рисунок 44б). Смещение статической поправки для гладкой модели на меньшие времена говорит о завышении скоростей в полученной модели. Постоянная составляющая разницы статических поправок не принимается во внимание т.к. легко компенсируется в последующей обработке данных. Но наличие тренда на графике разности значений статических поправок в истинной и гладкой моделях может привести к ошибочному тренду нижележащих горизонтов.

Истинная скоростная модель содержит неоднородный по латерали, низкоскоростной слой ЗМС, который вносит большой вклад в значение статической поправки. Повышение скорости в слое ЗМС на участке 7500 м-10500 м приводит к выклиниванию слоя ЗМС в слоистой модели в интервале 8000-8800 м. На остальных участках повышения скорости отсутствие аномальных значений статической поправки объясняется компенсацией изменения скорости в слое за счет кривизны границы.

Вторая норма невязок статических поправок после вычета постоянной составляющей составила 0.167 для гладкой модели и 0.136 для слоистой. Что показывает эффективность применения такого метода построения слоистой скоростной модели для задачи расчета априорных статических поправок в рассматриваемом классе моделей [Чернышов, 2022].



Рисунок 44 - Графики изменения статических поправок. а) величина статической поправки до кровли многолетнемерзлых пород для каждой точки профиля, б) разность статических поправок.

Построение слоистой скоростной модели ВЧР позволило встроить ее в общую ГСМ, которая потом уточнялась методом томографии по данным отраженных волн и далее использовалась для миграции данных. Заметим, что использование гладкой скоростной модели было невозможно, т.к. не поддерживается в используемом ПО. Что позволило повысить точность прослеживания горизонтов в глубинной модели, относительно обработки без использования скоростной модели ВЧР - только по отраженным волнам.

Так же алгоритм построения модели ВЧР был протестирован на аналогичной модели с 3D системой наблюдений. Система наблюдений: шаг по ПП 50м, шаг по ПВ 50м, расстояние между линиями приема/возбуждения 300м. Синтетические сейсмограммы были предоставлены рассчитаны специалистами «Сейсмотек». Времена первых вступлений были получены в результате пикировки «по уровню». После отбраковки ошибочных зон в моделировании, объем данных составил 5934077 времен. Результат применения томографической инверсии и конвертации гладкой модели в слоистую, со скоростями в слоях 700 м/с, 900 м/с, 1200 м/с, 2400 м/с, приведен на рисунке 45.



Рисунок 45 - Сопоставление скоростных разрезов ВЧР рассчитанной модели справа и истинной слева для трех инлайнов используемого грида.

Результатом стало «достаточное» соответствие полученной и истинной моделей для встраивания в общую ГСМ и дальнейшей глубинной миграции данных.

3.3. Апробация модифицированного алгоритма на реальных данных

Тестирование на реальных данных малоглубинной сейсморазведки включало набор данных инженерно-сейсмологического обследования, проведенного в районе перспективного строительства тоннеля. Район характеризуется значительными изменениями рельефа. Анализ геологической карты показывает, что геологический разрез должен состоять из трех типов пород: дисперсные грунты/глины, выветренные габбро-диориты, габбродиориты.

Система наблюдения состояла из трех профилей с 163 вертикальными и горизонтальными (перпендикулярно профилю) приемниками. Общая длина профиля - 800 м. Возбуждение Р-волн производилось в 25 точках, источником

выступали - пороховые заряды, поджигаемые в полуметровых глубинных скважинах, заполненных водой. Возбуждение S-волн производилось в 21 точке посредством удара кувалдой по стенкам неглубокой ямы в грунте (25х40 см). Возбуждение в каждой точке включало два удара в противоположных направлениях перпендикулярно сейсмическому профилю. Записи противоположных ударов вычитались для подавления P-волн и усиления S-волн. Наблюдаемые времена пробега первых вступлений для P- и S-волн показаны черными линиями на рисунке 46.

Выполнена томографическая инверсия времен пробега Р- и S-волн для параметризаций модели. Параметры инверсии: четырех размер томографической сетки - 2х7 м, количество томографических итераций — 12. Красными линиями на рисунке 46 показаны времена пробега первых вступлений для Р- и S-волн, вычисленные для окончательных томографических моделей, полученных в новой параметризации. Результирующие модели скорости Р-волн приведены на рисунке 47, отношение скоростных моделей Vs/Vp на рисунке 48. На рисунках 47 и 48 скоростные модели приводятся в порядке: (a) параметризация скорости, (b) параметризация медленности, (c) (скорость/медленность) параметризаций, чередование (d) новая параметризация. На обоих рисунках черные горизонтальные линии указывают на планируемое местоположение туннеля [Chernyshov et al., 2022].



Рисунок 46 - Времена пробега первых вступлений для: (а) Р-волны, (b) S-волны. Черные линии — наблюдаемые времена пробега, красные линии — времена пробега, рассчитанные для скоростных моделей после томогафической инверсии [Chernyshov et al., 2022].

Хотя в гладких томографических моделях нет резких границ, проводится оценка их глубины и геометрии через изоскорости гладкой модели [Zelt et al., 2003]. Пунктирные линии на рисунках 47 и 48 показывают изолинии скорости продольной волны, соответствующие 2000 м/с и 3500 м/с. Они разделяют три слоя, которые интерпретируются как: почвы/глины, выветренные габбродиориты, габбро-диориты (сверху вниз) на основе априорной информации. Согласно [Горяинов, 1992] водонасыщение снижает отношение Vs/Vp, для дисперсных грунтов оно может опускаться до 0,07. Для сцементированных пород значение уменьшается до 0,4-0,6. Таким образом, аномалии низкого Vs/Vp отношения интерпретируются высокодисперсные как ИЛИ водонасыщенные породы. Максимальное физически обоснованное отношение Vs/Vp составляет 0,7 (более высокие значения соответствуют отрицательному

коэффициенту Пуассона).



Рисунок 47 - Скоростная модель продольной волны (Vp) по результатам томографической инверсии для различных параметризаций модели: (a) скорость, (b) замедление, (c) чередование, (d) новая параметризация; черные сплошные линии — планируемое местоположение туннеля, пунктирные линии — изолинии скорости для 2000 м/с и 3500 м/с.



Рисунок 48 - Соотношение Vs/Vp по результатам томографии для различных параметризаций модели: (a) скорость, (b) замедление, (c) чередование, (d)

новая параметризация; черные сплошные линии — планируемое местоположение туннеля, пунктирные линии — изолинии скорости для 2000

м/с и 3500 м/с, зеленые эллипсы — области низких аномалий Vs/Vp.

Средние невязки времени пробега для томографии с различными параметризациями следующие (P-волна/S-волна): 2,29 / 3,5 мс для параметризации скорости, 4,25 / 6,5 мс для параметризации медленности, 3,21 / 3,5 мс для переменной (скорость/медленность) параметризации, 1,81 / 3 мс для новой параметризации.

Результат для параметризации скорости (Рисунок 48а) имеет больше

детальности аномалий на небольшой глубине. Однако отношение Vs/Vp (Рисунок 48а) содержит много небольших аномалий со значениями, превышающими 0.7, что говорит о ошибках решения обратной задачи, а не о геологической причине образования аномалий. Параметризация медленности (Рисунки 476 и 486) приводит к большим невязкам времени пробега, превышающим другие параметризации. Эта модель имеет наибольшую гладкость, не имея контрастных аномалий, которые могли бы стать опорными объектами для геологической интерпретации скоростной модели. Результат чередующейся параметризации (Рисунки 47в и 48в) дает негеологическую аномалию слева, см. зеленый круг. Здесь наблюдается аномалия с низким отношением Vs/Vp, которую можно интерпретировать как водонасыщенные дисперсные породы. Аномалия присутствует во всех томографических результатах, но на рисунке 48в эта аномалия имеет очень низкие значения и распространяется вверх по склону, что не выглядит естественным. Также имеется большая аномалия с высоким отношением Vs/Vp, превышающим 0,7 в верхней части. Новая параметризация (Рисунки 47г и 48г) обеспечивает несоответствия времени пробега противоречит минимальные И не геологическим предположениям [Chernyshov et al., 2022].

При интерпретации результатов целевыми являются аномалии с низким отношением Vs/Vp, выделенные зелеными эллипсами на рисунке 48. Левая аномалия (зеленый круг) интерпретируется как область дисперсных водонасыщенных пород, которая распространяется в нижний слой габбродиорита. Вторая аномалия (зеленый эллипс) интерпретируется как водонасыщенная трещиноватая или разломная зона. Интерпретация хорошо подтверждается результатом с новой параметризацией модели (Рисунок 48г); аномалия с низким отношением Vs/Vp прослеживается до поверхности, что согласуется с интерпретацией водонасыщенной трещиноватой зоны. Общий вывод заключается в том, что сейсморазведка выявила две зоны разрыхленных водонасыщенных зон в слое габбро-диорита. Таким образом, участок не рекомендуется для строительства туннеля, если не будут проведены

дополнительные буровые и геологические исследования [Chernyshov et al., 2022].

Тестирование на реальных данных разведочной сейсморазведки включало набор данных сформированный сотрудниками АО «СНИИГиМС». Он представлял собой: набор сейсмограмм 2D криволинейного профиля, предварительная пикировка первых вступлений «по фазе» (default picks). Параметры системы наблюдения: шаг по ПП - 25м, шаг по ПВ - 25м, длина активной расстановки - 6 км, длина профиля - 18.5 км, общее количество трасс -149524. Данные В среднем хорошего качества, но присутствует высокоамплитудный шум сторонних источников (Рисунок 49). Дополнительно ко всему набору был применен алгоритм автоматической пикировки первых вступлений «по срыву» (Рисунок 50).



Рисунок 49 - Пример сейсмограммы с нанесенными временами первых вступлений, синим – времена «по срыву», оранжевым – времена АО «СНИИГиМС».



вступлений, синим – времена «по срыву», оранжевым – времена АО «СНИИГиМС».

Для качественного анализа результатов модфицированного алгоритма были построены две скоростные модели: по пикировке «по фазе», по пикировке «по срыву». Так как глубинами аномалий, существенно влияющими на форму статических поправок, были выбраны глубины порядка 200-300м, все дальнейшие результаты получены использованием с параметризации медленности, реализованном В программе ST3D [Свидетельство 0 государственной регистрации программы ЭВМ 2020615981]. Также имелась скоростная модель ВЧР построенная сотрудниками АО «СНИИГИМС» в пакете TomoPlus.

Для расчета 2D модели необходимо перейти от 3D координат криволинейного профиля к 2D координатам вдоль профиля. Профиль имеет два изгиба (Рисунок 51), координата рассчитывалась вдоль линии приемников, дополнительно не сглаживалась.



Рисунок 51 - Положение приемников на профиле.

Первая модель получена со следующими входными данными и параметрами [Чернышов и др., 2024]:

- времена первых вступлений «по фазе»;
- количество итераций томографической инверсии 10
- размер дискретизации модели dx = 5M, dy = 1M
- параметр гладкости сеточной модели по горизонтали 2
- параметр гладкости сеточной модели по вертикали 2.5

• параметры градиента в начальной скоростной модели – минимальная скорость - 1000м/с, градиент до высоты -100м составлял 13.2м/с на 1м, ниже высоты -100м градиент 3.5м/с на 1м.

В результате была получена скоростная модель (Рисунок 52, снизу) и совокупность годографов, рассчитанных по модели (Рисунок 52, сверху). Среднеквадратичная невязка наблюдаемых и рассчитанных в модели времен составила 4мс.



Рисунок 52 - Результат применения метода лучевой томографии, совокупность годографов - сверху, скоростная модель - снизу, пикировка «по фазе» [Чернышов и др., 2024].

Для контроля качества получаемой модели важным шагом является визуализация покрытия модели лучами рефрагированных волн (Рисунок 53). Видно, что исследуемая область модели имеет хорошее покрытие лучами – отсутствуют области без лучей.



Рисунок 53 - Скоростная модель ВЧР, черным – лучи рефрагированных волн.

Для сравнения приводится скоростная модель, построенная сотрудниками АО «СНИИГИМС» в пакете Tomoplus по пикировке *«по фазе»* (Рисунок 54).



Рисунок 54 - Скоростная модель TomoPlus, пикировка «по фазе».

Вторая скоростная модель рассчитана с входными данными и параметрами:

- времена первых вступлений «по срыву»;
- количество итераций томографической инверсии 15
- размер дискретизации модели dx = 5M, dy = 1M
- параметр гладкости сеточной модели по горизонтали 2
- параметр гладкости сеточной модели по вертикали 1.5

• параметры градиента в начальной скоростной модели – минимальная скорость - 1000м/с, градиент до высоты -100м составлял 13.2м/с на 1м, ниже высоты -100м градиент 3.5м/с на 1м.

Гладкость модели по вертикали была уменьшена для получения более детального строения (Рисунок 55). Среднеквадратичная невязка времен составила 6.4мс.



Рисунок 55 - Результат применения метода лучевой томографии, пикировка «по срыву».

Отсутствие верхнего низкоскоростного слоя, относительно первой модели, связано с отсутствием постоянного сдвига годографов на большие времена, связанным с фазовой поправкой в пикировке *«по фазе»*.

Далее контроль качества скоростных моделей производился путем сравнительного анализа сейсмических временных разрезов со статическими поправками, рассчитанными в семи скоростных моделях ВЧР и с постоянной скоростью «за рельеф». Модели отличались алгоритмом томографической инверсии (ПО «ST3D», ПО «TomoPlus»), используемой пикировкой первых вступлений, параметрами гладкости:

1. Пикировка «по фазе», не гладкая модель, ПО «TomoPlus» (Рисунок 56.1).

2. Пикировка «по фазе», гладкая модель, ПО «TomoPlus» (Рисунок 56.2).

3. Пикировка «по фазе», не гладкая модель, ПО «ST3D» (Рисунок 56.3).

4. Пикировка «по фазе», гладкая модель, ПО «ST3D» (Рисунок 56.4).

5. Пикировка СНИИГИМС «по срыву», гладкая модель, ПО «TomoPlus» (Рисунок 61.1).

6. Пикировка «по срыву», гладкая модель, ПО «TomoPlus» (Рисунок 61.2).

7. Пикировка «по срыву», не гладкая модель, ПО «ST3D» (Рисунок 61.3).

8. Статика «за рельеф» с постоянной скорость.

Граф обработки, за исключением расчета статических поправок, был идентичен для всех разрезов. Расчет статических поправок выполнялся сотрудниками АО «СНИИГИМС». Статические поправки рассчитывались до линии изоскорости 5000м/с, уровень приведения -650м. На рисунке 57 приведены статические поправки для четырех моделей с пикировкой «по фазе» (1-4).



Рисунок 56 - Скоростные модели ВЧР 1-4 соответственно.



Рисунок 57 - Статические поправки за ПВ для скоростных моделей ВЧР 1-4.

На разрезах красным/желтым/зеленым будут отмечаться зоны отличия, красным – в худшую сторону, зеленым – в лучшую. Критериями качества являются спрямляемость горизонтов и их когерентность (фокусировка). Разрез с статическими поправками «за рельеф» имеет худшую спрямляемость и когерентность горизонтов (Рисунок 58).



Рисунок 58 - Разрезы для моделей ВЧР «8-постоянная скорость от рельефа».

На рисунке 59 приведены разрезы для моделей 1 и 2 соответственно (ПО Tomoplus, пикировка «по фазе»). Видно, что хотя не гладкая модель должна восстанавливать больше особенностей ВЧР, использование такой модели для расчета статических поправок приводит к худшим результатам по сравнению с гладкими моделями. В данном случае поправки для не гладкой модели приводят к «недоспрямленности» горизонтов в отмеченной зоне.



Рисунок 59 - Разрезы для моделей ВЧР «1-не гладкая» и «2-гладкая» (TomoPlus).

Далее приводятся разрезы для статических поправок по моделям 3 и 4 (Рисунок 60) (ПО «ST3D», пикировка «по фазе»). Отмечается искаженность горизонтов на краях разреза по сравнению с моделями 1 и 2, связанно с неточностью томографического решения на краях области ВЧР. Спрямленность горизонтов лучше для гладких моделей, относительно не гладких, как в TomoPlus (модель 2) так и в ПО «ST3D» (модель 4), хотя модель ST3D немного уступает модели Tomoplus.



Рисунок 60 - Разрезы для моделей ВЧР «3-не гладкая» и «4-гладкая» (ПО «ST3D»).

Модели ВЧР полученные для пикировок «по срыву» (Рисунок 61). Статические поправки для моделей приведены на рисунке 62.



Рисунок 61 - Скоростные модели ВЧР 5-7 соответственно.



Рисунок 62 - Статические поправки за ПВ для моделей ВЧР 5-7.

На рисунке 63 приводятся разрезы для моделей ВЧР «по срыву» 5пикировка СНИИГИМС и 6-пикировка обе построены в ПО TomoPlus. Разрез для модели 5 имеет лучшую спрямленность горизонта в правой части, при этом в средней части имеет худшую когерентность горизонтов, также ухудшение когерентности видно в деталях остального разреза.



Рисунок 63 - Разрезы для моделей ВЧР «5-пикировка СНИИГИМС» и «6пикировка» (ТотоPlus).

Далее приводится сравнение разрезов для модели 5 - TomoPlus и 7 - ПО «ST3D» (Рисунок 64). Сравнение можно считать ключевым, т.к. разрезы были определены авторами как наилучшие. Разрезы по спрямленности горизонтов идентичны, отличия присутствуют в когерентности. При этом когерентность горизонтов может быть значительно улучшена дальнейшими процедурами обработки – коррекция статики/кинематики. Можно сделать заключение об эквивалентности результатов в ПО TomoPlus и «ST3D», для рассматриваемых пикировок [Митрофанов, Чернышов, 2024].



исунок 64. Разрезы для моделей ВЧР «5-пикировка СНИИГИМС, ПО TomoPlus» и «7-пикировка, ПО «ST3D»».

Тестирование на реальных данных разведочной сейсморазведки показало:

1. Гладкие модели ВЧР лучше подходят для расчета статических поправок в рассматриваемом наборе данных

2. Для пикировки «по фазе» была отмечена проблема ПО ST3D в краевых зонах (решается алгоритмически)

3. Для пикировки «по фазе» кроме краевых зон ПО ST3D немного уступает по спрямленности горизонтов ПО TomoPlus

4. Для пикировки «по срыву» модели, полученные в ПО TomoPlus и ST3D идентичны за исключением нескольких зон разной когерентности горизонтов

По результатам верификации алгоритма на малоглубинных и разведочных данных сделаны выводы:

1. Использование разного веса параметризации модели изменяет чувствительность томографической инверсии к аномалиям на разных глубинах.

2. Следовательно, можно выбрать оптимальную параметризацию, учитывая ожидаемую глубину скоростных аномалий. Когда ожидаются

только неглубокие аномалии, можно использовать параметризацию скорости. Когда ожидаются только глубокие аномалии, можно выбрать параметризацию медленности . В общем случае параметризация обеспечивает оптимальные результаты с хорошим разрешением восстановленных аномалий скорости на всех глубинах в пределах региона с хорошим лучевым покрытием.

3. Верификация на реальных разведочных данных показало эквивалентность результатов модифицированного алгоритма, реализованного в ПО «ST3D», и коммерческого аналога.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результат исследования - новая методика получения и обработки вибросейсмических данных с подавлением корреляционного шума и модификация алгоритма лучевой томографии с возможностью подбора оптимальной параметризации модели при построения скоростной модели ВЧР. Разработанные алгоритмы теоретически и экспериментально обоснованы.

Вывод явных формул генерации НЧ свип-сигнала с компенсацией заниженного усилия вибрационной установки на низких частотах позволил эффективно программно реализовать алгоритм, для применения при производстве вибросейсмических работ. Разработанные методика тестирования вибрационных установок на возможность генерации низких частот и рекомендации по подбору оптимальных параметров НЧ свип-сигнала позволяет формализовать этап опытно-методических работ по подбору частоты выхода на максимальное усилие для различных моделей вибрационных установок.

Применение к виброграммам детерминистической деконволюции по сигналу усилия на грунт (GF) и алгоритмов подавления гармонических шумов повышает точность снятия времен первых вступлений для вибрационных данных. Повышение точности времен первых вступлений позволит эффективнее применять алгоритмы их инверсии для построения скоростной модели верхней части разреза. За рамками исследования осталось повышение качества волнового поля на временах после первых вступлений - отраженных и поверхностных волн, так же осложненные рассматриваемыми видами шума.

Использование предложенной модификации лучевой сейсмической томографии путем умножения томографической матрицы на матрицу весов, связанную со скоростью в начальной скоростной модели позволяет контролировать чувствительность алгоритма к аномалиям на разных глубинах. В отличии от стандартных реализаций с параметризациями скоростью либо медленностью, что повышает точность построения скоростных моделей ВЧР.

Дальнейшее развитие исследования может быть направлено на разработку методики подбора оптимальных методов обработки данных и параметров свип-сигнала для малоглубинных вибрационных источников, характеризующихся небольшим усилием и отсутствием сигнала усилия на грунт (GF). На формализацию выбора оптимального метода регуляризации для томографической инверсии в рамках как слоистой, так и пластовой моделей. Разработку алгоритма, объединяющего слоистую и сеточную параметризацию моделей верхней части разреза при инверсии времен первых вступлений.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- ЗМС зона малых скоростей
- МОВ метод отражённых волн
- МПВ метод преломлённых волн
- ОГТ общая глубинная точка
- ОГП- общая глубинная площадка
- ОТВ общая точная возбуждения
- ОСТ общая средняя точка
- ПВ пункт возбуждения
- ПП пункт приёма
- ГСЗ– глубинное сейсмическое зондирование
- GF усилие на грунт
- TV общая вариация
- PSD плотность спектра мощности

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акуленко А.С. Анализ эффективности технологий подавления эффектов наложения гармонических искажений, возникающих при выполнении сейсморазведочных работ методом Slip-Sweep / Акуленко А.С., Гафаров Р.М., Сираев И.А. // Приборы и системы разведочной геофизики. –2023. – №. 1. – С. 15-28.

 Анализ эффективности методов подавления помех вибрационных данных / Чернышов Г. С. [и др.] // PROHEΦTЬ. Профессионально о нефти. – 2024. – Т.
 9. – №. 3. – С. 17-25.

3. Бондарев В. И. Сейсморазведка //Современные проблемы науки и образования. – 2009. – №. 1. – С. 81-82.

4. Владов М. Л. О проблемах инженерной сейсморазведки / Владов М. Л., Капустин В. В. // Технологии сейсморазведки. – 2014. – №. 2. – С. 104.

 Гафаров Р. М. Применение следящей фильтрации при обработке данных Slip sweep // Геофизика. – 2012. – №. 4. – С. 47-53.

6. Глубинные вибросейсмические исследования на Дальнем востоке
 России / Селезнев В. С. [и др.] // Проблемы информатики. – 2013. – №. 3 (20). –
 С. 30-41.

 Гольдин С. В. Интерпретация системой КИНГ годографов преломленных волн при сложном рельефе дневной поверхности / Гольдин С. В., Киселева Л. Г., Курдюкова Т. В. // Геология и геофизика. – 1985. – №. 6. – С. 120-126.

8. Горяинов Н. Н. Применение сейсмоакустических методов в гидрогеологии и инженерной геологии // Недра. – 1992. – Т. 7.

9. Давлетханов Р. Т. Коррекция сейсмических записей за влияние верхней части разреза с сохранением кинематики отражённых волн, соответствующих пластовой модели среды : дис. – Моск. гос. ун-т им. МВ Ломоносова, 2017.

10. Денисов М. С. Оптимизационная рекурсивная фильтрация как способ подавления гармоник в методе вибросейс / Денисов М. С., Егоров А. А. // Геофизические технологии. – 2020. – №. 2. – С. 23-53.

11. Долгих Ю. Н. Методика коррекции сейсмоструктурных построений за

длиннопериодные погрешности, обусловленные влиянием неоднородностей ВЧР // Технологии сейсморазведки. – 2010. – №. 3. – С. 60-68.

12. Долгих Ю. Н. Многозональная адаптивная обработка виброграмм как перспективное направление повышения качества и информативности современной сейсморазведки / Долгих Ю. Н., Кайгородов Е. П., Глебов А. А. // Современные технологии нефтегазовой геофизики. – 2019. – С. 32-39.

 Еманов А. Ф Динамический пересчет головных волн при обработке данных сейсморазведки / Еманов А. Ф, Селезнев В.С, Коршик Н.А. // Геология и геофизика. – 2008. – Т. 49, – № 10. – С. 1031–1045

14. Епинатьева А. М. (ред.). Метод преломленных волн // Недра. - 1990.

 Жуков А. П. Пути повышения производительности вибросейсморазведки / Жуков А. П., Скирта Д. А., Шехтман Г. А. // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2022. – №. 2. – С. 57-70.

16. Кабанник А. В. Определение скоростной структуры среды с известными и неизвестными источниками методом сейсмической томографии без трассировки лучей : дис. – Объединенный институт геологии, геофизики и минералогии им. АА Трофимука СО РАН, 2005.

17. Караев Н.А. Рудная сейсморазведка / Караев Н.А., Рабинович Г.Я. // М.:
ЗАО «Геоинформмарк». – 2000. – 366 с.

 Любушин А.А. Анализ данных геофизического и экологического мониторинга / М.: Наука, 2007. 230 с.

Методика и результаты исследования физико-механических свойств связных грунтов сейсмическим методом / Курленя М. В., Сердюков А.С., Чернышов Г.С. и др. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – №. 3. – С. 3-10.

20. Методика и результаты сейсмического исследования процессов образования оползней в условиях многолетнемерзлых пород / Курленя М. В., Чернышов Г.С. и др. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – №. 5. – С. 6-13.

Никитин А.А. Свидетельство о регистрации программы ЭВМ ST3D / А.А.
 Никитин, А.А. Дучков, И.Ю. Кулаков, Г.С. Чернышов // Св-во о регистр. прогр.
 2020615981; RU; № 2020615095, заявл. 01.06.2020, опубл. 05.06.2020.

22. Нолет Г. Распространение сейсмических волн и сейсмическая томография
// Сейсмическая томография / под ред. Г. Нолета. – М.:Мир. – 1990. – Гл. 1. С.
9-33

23. Пузырев Н. Н. Методы и объекты сейсмических исследований. Введение в общую сейсмологию // Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ. – 1997.

24. Подход к построению слоистой скоростной модели верхней части разреза по данным времен первых вступлений / Чернышов Г.С. [и др.] // Нефтяное хозяйство. – 2022. – № 1. – С. 26-31.

25. Разработка и применение портативной вибрационной установки для сбора и анализа данных сейсмических поверхностных волн / Яблоков А.В. [и др.] // Сейсмические приборы. – 2022. –Т. 58 (4) –С. 5–18

26. Сейсмические неоднородности верхней мантии под Сибирским кратоном (профиль Метеорит) / Суворов В. Д. [и др.] // Геология и геофизика. – 2013. – Т. 54. – №. 9. – С. 1411-1426.

27. Сейсмическое районирование района тэутэджакского рудного поля (магаданская область) / Алёшина Е. И. [и др.] // Российский сейсмологический журнал. – 2023. – Т. 5. – №. 1. – С. 60-74.

Сердюков А.С. Двухточечное трассирование лучей на основе решения уравнения эйконала / Сердюков А.С., Протасов М.И. // Геофизика. – 2012. – № 3. – С. 13-17.

29. Скворцов А.Г. Методические особенности изучения сейсмогеокриологического разреза / Скворцов А.Г., Царев А.М., Садуртдинов М.Р. // Криосфера Земли. – 2011. – Т. XV. – No 4. – С. 110–113.

30. Суворов В. Д. Сейсмические неоднородности верхней и всей коры Алдано-Станового щита (профиль 3-ДВ) / Суворов В. Д., Мельник Е. А., Павлов Е. В. // Геодинамика и тектонофизика. – 2023. – Т. 14. – №. 1. – С. 1-14.

31. Сысоев А. П. Параметрический способ учета неоднородности верхней части разреза при обработке данных могт / Сысоев А. П., Горелик Г. Д. // Геология и геофизика. – 2017. – Т. 58. – №. 6. – С. 948-954.

32. Тестирование алгоритма определения скоростной модели верхней части среды по временам первых вступлений / Митрофанов Г. М., Чернышов Г.С. [и др.] //Геофизические технологии. – 2024. – №. 2. – С. 4-16.

33. Тихоцкий С. А. Активная лучевая сейсмическая томография с использованием адаптивной параметризации системой вэйвлет-функций / Тихоцкий С. А., Фокин И. В., Шур Д. Ю. // Физика Земли. – 2011. – №. 4. – С. 67-67.

34. Фиников Д. Б. Способ сейсморазведки с вибрационными источниками / Фиников Д. Б., Шалашников А. В. // Материалы 23-й конференции по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа «ГЕОМОДЕЛЬ 2021» (Геленджик, 06–10 сентября 2021 года). - Москва – 2021.

35. Чеверда В. А. Реконструкции глубинной скоростной модели путем разномасштабного обращения полного волнового поля / Чеверда В. А., Гадыльшин К. Г. // Геофизика. – 2018. – №. 3. – С. 101-105.

36. Чернышов Г. С. Методы возбуждения низкочастотных свип-сигналов в сейсморазведочных работах / Чернышов Г. С., Литвиченко Д. А., Дучков А. А. // Интерэкспо ГЕО-Сибирь - ХХ Международный научный конгресс. Международная научная конференция "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология": Сборник материалов в 8 т. (Новосибирск, 13-17 мая 2024 г.). – 2024. – Т. 2. – № 2. – С. 75-82.

37. Чугаев А. В. Теоретические основы и практика малоглубинных скважинных сейсмических исследований при эксплуатации месторождений водорастворимых полезных ископаемых: диссертация ... доктора технических наук: 2.8.3 / Чугаев Александр Валентинович. – Пермь, 2024. – 247 с.

38. Шнеерсон М. Б. (ред.). Вибрационная сейсморазведка // Недра, 1990.
39. Шнеерсон М.Б. Современные тенденции вибрационной сейсморазведки /
Шнеерсон М.Б., Жуков А.П. // Приборы и системы разведочной геофизики. –
2015. – Т. 47. – №. 3. – С. 19-25

40. Шнеерсон М. Б. Современные технологии возбуждения сейсмических волн / Шнеерсон М. Б., Жуков А. П. // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2013. – Т. 45. – №. 3. – С. 6-22.

41. Acquisition and deconvolution of seismic signals by different methods to perform direct ground-force measurements / Poletto F. [et al.] // Journal of Applied Geophysics. -2016. - T. 135. - P. 191-203.

42. Akram J. A review and appraisal of arrival-time picking methods for downhole microseismic data / Akram J., Eaton D. W. //Geophysics. – 2016. – T. 81. – №. 2. – P. KS71-KS91.

43. Anagaw A. Y. Edge-preserving seismic imaging using the total variation method / Anagaw A. Y., Sacchi M. D. // Journal of Geophysics and Engineering. – 2012. – T. 9. – №. 2. – P. 138-146.

44. An introduction to full waveform inversion / Virieux J. [et al.] // Encyclopedia of exploration geophysics. – Society of Exploration Geophysicists, 2017. – P. R1-1-R1-40.

45. Application of deconvolution method with ground force in vibroseis raw shots calculation / Ma T. [et al.] // Progress in Geophysics. $-2020. - T. 35. - N_{\odot}. 4. - P.$ 1438-1444.

46. Assessment of crustal velocity models using seismic refraction and reflection tomography / Zelt C. A. [et al.] // Geophysical Journal International. -2003. - T. 153. $- N_{\odot}$. 3. - P. 609-626.

47. Backus G. E. Numerical applications of a formalism for geophysical inverse problems / Backus G. E., Gilbert J. F // Geophysical Journal International. – 1967. – T. 13. – №. 1-3. – P. 247-276.

48. Bagaini C. Low-frequency vibroseis data with maximum displacement sweeps // The Leading Edge. $-2008. - T. 27. - N_{\odot}. 5. - P. 582-591.$

49. Baradello L. Vibroseis deconvolution: A comparison of pre and post correlation vibroseis deconvolution data in real noisy data / Baradello L., Accaino F. // Journal of Applied Geophysics. – 2013. – T. 92. – P. 50-56.

Bianco M. J. Travel time tomography with adaptive dictionaries / Bianco M. J.,
Gerstoft P. // IEEE Transactions on Computational Imaging. – 2018. – T. 4. – №. 4. –
P. 499-511.

51. Bickel S. H. Plane-wave Q deconvolution / Bickel S. H., Natarajan R. R. // Geophysics. – 1985. – T. 50. – №. 9. – P. 1426-1439.

52. Blind test of methods for obtaining 2-D near-surface seismic velocity models from first-arrival traveltimes / Zelt C. A. [et al.] // Journal of Environmental and Engineering Geophysics. $-2013. - T. 18. - N_{\odot}. 3. - P. 183-194.$

53. Bouska J. Distance separated simultaneous sweeping, for fast, clean, vibroseis acquisition //Geophysical Prospecting. – 2010. – T. 58. – №. 1. – P. 123-153.

54. Cercato M. Focusing on soil-foundation heterogeneity through high-resolution electrical and seismic tomography / Cercato M., De Donno G. // Near Surface Geophysics. $-2018. - T. 16. - N_{\odot}. 1. - P. 67-78.$

55. Chernyshov G. S. Choosing optimal model parameterization for improving the accuracy of refraction seismic tomography / Chernyshov G. S., Duchkov A. A., Koulakov I. Y. // Near Surface Geophysics. -2022. -T. 20. - N. 2. - P. 135-146.

56. Cross-harmonic noise removal on slip-sweep vibroseis data / Baobin W. et al. // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2012. – Society of Exploration Geophysicists, 2012. – P. 1-5.

57. First arrival traveltime tomography using supervised descent learning technique / Guo R. [et al.] // Inverse Problems. $-2019. - T. 35. - N_{\odot}. 10.$

58. Full waveform inversion based on an asymptotic solution of Helmholtz equation / Protasov M. [et al.] // Geosciences. $-2023. - T. 13. - N_{\odot}. 1. - C. 19.$

59. Harmonic by harmonic removal technique for improving vibroseis data quality / Abd El A. E. A. K. [et al.] // Geophysical Prospecting. – 2011. – T. 59. – №.
2. – P. 279-294.

60. Interlobate esker architecture and related hydrogeological features derived

from a combination of high-resolution reflection seismics and refraction tomography, Virttaankangas, southwest Finland / Maries G. [et al.] // Hydrogeology Journal. – $2017. - T. 25. - N_{\odot}. 3. - P. 829-845.$

Koulakov I. Creating realistic models based on combined forward modeling and tomographic inversion of seismic profiling data / Koulakov I., Stupina T., Kopp H. // Geophysics. – 2010. – T. 75. – №. 3. – P. B115-B136.

62. Lanz E. Refraction tomography over a buried waste disposal site / Lanz E., Maurer H., Green A. G. // Geophysics. – 1998. – T. 63. – №. 4. – P. 1414-1433.

63. Lévěque J. J. On the use of the checker-board test to assess the resolution of tomographic inversions / Lévěque J. J., Rivera L., Wittlinger G. // Geophysical Journal International. – 1993. – T. 115. – №. 1. – P. 313-318.

64. Lin Y. Acoustic-and elastic-waveform inversion using a modified totalvariation regularization scheme / Lin Y., Huang L. // Geophysical Journal International. $-2014. - T. 200. - N_{\odot}. 1. - P. 489-502.$

65. Li Z. Deep learning guiding first-arrival traveltime tomography / Li Z., Jia X., Zhang J. // SEG International Exposition and Annual Meeting. – SEG, 2019.

66. Loginov G. The first-break detection for real seismic data with use of convolutional neural network / Loginov G.,Duchkov A., Litvichenko D.A., Alyamkin S.A. // 81st EAGE Conference and Exhibition 2019. EAGE Publications BV, 2019. Vol. 2019. P. 1–5.

67. Luo Y. Strategies in adjoint tomography / Luo Y., Modrak R., Tromp J. // Handbook of Geomathematics: Second Edition. – Springer Berlin Heidelberg, 2015.
– P. 1943-2001.

68. Martin F. D. Deharmonics, a method for harmonic noise removal on vibroseis data / Martin F. D., Munoz P. A. // EAGE workshop on Developments in Land Seismic Acquisition for Exploration. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2010. – P. 159-00010.

69. Method and application of extending seismic vibrator bandwidth toward low frequency / Li G. [et al.] // Advances in Mechanical Engineering. – 2019. – T. 11. – №. 10. – Р. 1687814019884772.

70. Multichannel analysis of surface waves and down-hole tests in the archeological "Palatine Hill" area (Rome, Italy): evaluation and influence of 2D effects on the shear wave velocity / Di Fiore V. [et al.] //Surveys in Geophysics. – 2016. – T. 37. – N_{2} . 3. – P. 625-642.

Nikitin A. A. Cache-efficient parallel eikonal solver for multicore CPUs / Nikitin A. A., Serdyukov A. S., Duchkov A. A. // Computational Geosciences. – 2018. – T. 22. – P. 775-787.

Nolet G. (ed.) Seismic tomography: with applications in global seismology and exploration geophysics // V. 5. Springer Science & Business Media. - 2012.- P. 385
Nolet G. Seismic wave propagation and seismic tomography //Seismic tomography: With applications in global seismology and exploration geophysics. – Dordrecht: Springer Netherlands, 1987. – P. 1-23.

74. Paige C. C. LSQR: An algorithm for sparse linear equations and sparse least squares / Paige C. C., Saunders M. A. // ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS). $-1982. - T. 8. - N_{\odot}. 1. - P. 43-71.$

75. Palmer D. Is accuracy more important than precision in near-surface refraction seismology? // Near Surface Geophysics. $-2015. - T. 13. - N_{\odot}. 1. - P. 1-18.$

Park C. B. Multichannel analysis of surface waves / Park C. B., Miller R. D.,
Xia J. // Geophysics. – 1999. – T. 64. – №. 3. – P. 800-808.

Rawlinson N. Seismic tomography: A window into deep Earth / Rawlinson N.,
Pozgay S., Fishwick S. // Physics of the Earth and Planetary Interiors. – 2010. – T.
178. – №. 3-4. – P. 101-135.

Problems with the standard vibroseis deconvolution: some practical solutions /
Vedanti N. [et al.] // Exploration Geophysics. – 2021. – T. 52. – №. 3. – P. 308-320.

79. Rozemond H. J. Slip-sweep acquisition // SEG Technical Program Expanded Abstracts 1996. – Society of Exploration Geophysicists, 1996. – P. 64-67.

80. Sambridge M. S. Non-linear arrival time inversion: constraining velocity anomalies by seeking smooth models in 3-D //Geophysical Journal International. – 1990. – T. 102. – N_{2} . 3. – P. 653-677.

81. Saragiotis C. On the accuracy of the ground force estimated in vibroseis acquisition / Saragiotis C., Scholtz P., Bagaini C. //Geophysical Prospecting. – 2010.
- T. 58. – №. 1. – P. 69-80.

82. Seismic tomography on the castle hill in Quedlinburg / Schicht T. [et al.] // Near Surface Geophysics. $-2007. - T. 5. - N_{\odot}. 5. - P. 339-343.$

83. Seismic traveltime tomography of the crust and lithosphere / Rawlinson N. [et al.] // Advances in geophysics. - 2003. - T. 46. - P. 81-199.

84. Shallow geophysical survey at the archaeological site of San Miguel Tocuila,
Basin of Mexico / Arciniega-Ceballos A. [et al.] // Journal of Archaeological Science.
2009. – T. 36. – №. 6. – Р. 1199-1205.

85. Structure of the crust in the Baikal rift zone and adjacent areas from Deep Seismic Sounding data / Suvorov V. D. [et al.] // Tectonophysics. – 2002. – T. 351. – №. 1-2. – P. 61-74.

86. Sun R. Reprocessing of high-resolution seismic data for imaging of shallow groundwater resources in glacial deposits, SE Sweden / Sun R., Kaslilar A., Juhlin C. // Near Surface Geophysics. $-2020. - T. 18. - N_{\odot}. 5. - P. 545-559.$

87. Tarantola A. Inverse problem theory and methods for model parameter estimation. // Society for industrial and applied mathematics. -2005. - P. 342.

88. Tellier N. Low-frequency Vibroseis: current achievements and the road ahead?
/ Tellier N., Ollivrin G. // First Break. – 2019. – T. 37. – №. 1. – P. 49-54.

89. The low-frequency seismic vibrator: design and experimental verification / Wei Z. [et al.] // First Break. $-2018. - T. 36. - N_{\odot}. 1. - P. 77-84.$

90. Tikhotskii S. A. Traveltime seismic tomography with adaptive wavelet parameterization / Tikhotskii S. A., Fokin I. V., Schur D. Y. // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. – 2011. – T. 47. – P. 326-344.

91. Tong P. Multiple-grid model parametrization for seismic tomography with application to the San Jacinto fault zone / Tong P., Yang D., Huang X. // Geophysical Journal International. $-2019. - T. 218. - N_{\odot}. 1. - P. 200-223.$

92. Trabi B. Comparison of slowness vs. velocity perturbations in Bayesian seismic inversion // Leoben: Leoben University. - 2018.- P. 75.

93. Jiang W. 3D first-arrival traveltime tomography with modified total variation regularization / Jiang W., Zhang J. // Journal of Geophysics and Engineering. – 2018.
– T. 15. – №. 1. – P. 207-223.

94. Van Der Veen M. Weighted sum method for calculating ground force: An evaluation by using a portable vibrator system / Van Der Veen M., Brouwer J., Helbig K. // Geophysical Prospecting. – 1999. – T. 47. – №. 3. – P. 251-267.

95. Varga L. Discrete tomographic reconstruction via adaptive weighting of gradient descents / Varga L., Balázs P., Nagy A. // Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering: Imaging & Visualization. – 2015. – T. 3. – N_{\odot} . 2. – P. 101-109.

96. Wang Y. A stable and efficient approach of inverse Q filtering //Geophysics. –
2002. – T. 67. – №. 2. – P. 657-663.

97. Wang Y. Time-frequency Analysis of Seismic Signals / Wiley & Sons. - 2022.
- 240 p.

98. Wei Z. The vibrator-ground model and the vibroseis source wavelet // First Break. $-2017. - T. 35. - N_{\odot}. 6.$

99. Wei Z. Harmonic distortion reduction on seismic vibrators / Wei Z., Phillips T.
F. // The Leading Edge. – 2010. – T. 29. – №. 3. – P. 256-261.

100. Yilmaz Ö. Engineering seismology with applications to geotechnical engineering // SEG: Tulsa. - 2015.- P. 964.

101. Yilmaz Ö. Seismic data analysis: Processing, inversion, and interpretation of seismic data. – Society of exploration geophysicists, 2001.

102. Zelt C. A. Seismic traveltime inversion for 2-D crustal velocity structure / Zelt
C. A., Smith R. B. // Geophysical journal international. – 1992. – T. 108. – №. 1. – P.
16-34.

103. Zelt C. A. Traveltime tomography using controlled-source seismic data
//Encyclopedia of solid earth geophysics. – Cham: Springer International Publishing,
2021. – P. 1828-1848.

104. Zhao H. A fast sweeping method for eikonal equations // Mathematics of computation. $-2005. - T. 74. - N_{\odot}. 250. - P. 603-627.$

105. Zhou H. Multiscale traveltime tomography // Geophysics. $-2003. - T. 68. - N_{\odot}. 5. - P. 1639-1649.$

106. Ziolkowski A. Review of vibroseis data acquisition and processing for better amplitudes: adjusting the sweep and deconvolving for the time-derivative of the true groundforce // Geophysical Prospecting. $-2010. - T. 58. - N_{\odot}. 1. - P. 41-54.$

СПИСОК ИЛЛЮСТРАТИВНОГО МАТЕРИАЛА

Рисунок 1 - Спектрограммы трасс, слева - пилотного свип-сигнала, в центре – виброграммы, справа - коррелограммы, белым выделена целевая область коррелограммы.

Рисунок 2 - Пример коррелограммы, красным – области прослеживания корреляционных шумов до первых вступлений.

Рисунок 3 - Коррелограмма от двух последовательных возбуждений, красным- указаны области прослеживания гармонических шумов от второго возбуждения.

Рисунок 4 - График зависимости усилия вибратора от частоты на низких частотах для разных моделей вибрационных установок [Wei et al., 2018]

Рисунок 5 - График изменения частоты свип-сигнала от времени развертки.

Рисунок 6 - Рассчитанный НЧ свип-сигнал.

Рисунок 7. Амплитудный спектр рассчитанного НЧ свип-сигнала.

Рисунок 8 - Аналитическая зависимость усилия вибратора для f_x = 7 Гц, синим – для максимального усилия 70%, оранжевым – 60 и 75%.

Рисунок 9 - Аналитическая зависимость усилия вибратора для f_x = 5.5 Гц, синим – для максимального усилия 70%, оранжевым – 60 и 75%.

Рисунок 10 - График изменения average distortion от параметров монохроматического сигнала из Таблицы 1.

Рисунок 11 - График изменения average distortion от параметров монохроматического сигнала из Таблицы 2.

Рисунок 12 - Сейсмограммы одной приемной линии, слева – для линейного свип-сигнала 5-100 Гц, справа для НЧ свип-сигнала 3-100 Гц

Рисунок 13 - Импульс Клаудера для сигналов Ground Force: синим – при генерации линейного свип-сигнала 5-100 Гц, оранжевым – при генерации НЧ свип-сигнала 3-100 Гц.

Рисунок 14 – Коррелограммы в разных частотных диапазонах: вверху – НЧ свип-сигнала 3-100 Гц, 14 сек, внизу – линейного свип-сигнала 5-100 Гц, 12 сек.

Рисунок 15 - Совмещенные сигналы Ground Force для всех вибраторов в группе: вверху – сигналы, внизу – фазовые спектры.

Рисунок 16 - Финальные разрезы: слева – линейный свип, справа – НЧ свип.

Рисунок 17 - Амплитудные спектры разрезов на Рис. 16: красным – линейный свип-сигнал, синим – НЧ свип-сигнал.

Рисунок 18 - Финальные разрезы после полосовой фильтрации 0-3-5-7 Гц: слева – линейный свип, справа – НЧ свип.

Рисунок 19 - Финальные сейсмограммы: сверху – линейный свип-сигнал, снизу – НЧ свип-сигнал.

Рисунок 20 - Финальные сейсмограммы после полосовой фильтрации 0-3-5-9 Гц: сверху – линейный свип-сигнал, снизу – НЧ свип-сигнал.

Рисунок 21 – Коррелограммы со снятыми временами первых вступлений: для линейного свип-сигнала (вверху), для НЧ свип-сигнала, красные точки – времена, снятые с коррелограммы для линейного свип-сигнала, синие точки – для НЧ свип-сигнала

Рисунок 22 – Схематичное изображение устройства гидравлической вибрационной установки [Wei, 2017].

Рисунок 23 - Спектрограммы трасс в процедуре корреляции, слева - сигнала GF, в центре – виброграммы, справа - коррелограммы, белым – целевая область

Рисунок 24 – Коррелограммы, полученные с помощью корреляции: слева – с пилотным свип-сигналом, справа – с сигналом GF, помечены области прослеживания корреляционных шумов до первых вступлений и случайного шума на ближних удалениях.

Рисунок 25 – Коррелограммы, полученные с помощью деконволюции: слева – с пилотным свип-сигналом, справа – с рассчитанным свип-сигналом;

помечены области прослеживания корреляционных шумов до первых вступлений и случайного шума на ближних удалениях.

Рисунок 26 - Виброграммы с спектрограммами трасс, а – до, б – после «следящей фильтрации».

Рисунок 27 - Спектрограммы трасс коррелограмм, слева – до фильтрации, справа – после фильтрации виброграммы.

Рисунок 28 - Спектрограммы трасс, слева – коррелограммы до фильтрации, справа – модели гармонического шума.

Рисунок 29 - Коррелограммы, до фильтрации sliptime = 30%, после фильтрации гармонических шумов sliptime = 30%, без гармонических шумов с увеличенным sliptime = 50%, стрелками указываются области прослеживания гармонических шумов.

Рисунок 30 – Тест «шахматной доски» для сравнения результатов томографической инверсий для разных параметризаций модели: (а) истинные аномалии скорости, (б) восстановленные аномалии для параметризации скорости, (в) для параметризации медленностью (), (г) для новой параметризации (); черная рамка – приповерхностная область, красная рамка – глубинная область

Рисунок 31 - Истинная скоростная модель со сглаженными аномалиями, два уровня глубины для сравнения результатов томографической инверсии показаны черными линиями (Рисунок 32).

Рисунок 32 - Срезы скоростей результатов томографической инверсии на двух уровнях глубины (см. рисунок 31): 7,5 м (а) и 15 м (б); зеленая линия показывает истинные вариации скорости, результаты инверсии для различных параметризаций модели показаны другими цветами.

Рисунок 33 – Сумма относительной погрешности построения скоростной модели на разных глубинах в зависимости параметризации (о).

Рисунок 34 – Плотность лучей в модели после пятой итерации.

Рисунок 35 – Тест гладкой шахматной доски для сравнения томографических инверсий после: (а) аномалии для параметризации , (б)

томография со скоростной параметризацией и взвешиванием плотностью лучей.

Рисунок 36 – Тест с поднятым блоком: (а) истинная скоростная модель, черная рамка – область для оценки невязки по скорости, (б) аномалии скорости по томографической инверсии в новой параметризации

Рисунок 37 - Средняя абсолютная ошибка между истинной моделью скорости и результатами томографической инверсии (черная рамка на Рисунке 41а) на разных итерациях томографии (горизонтальная ось) и различных параметризаций модели (цвет линии).

Рисунок 38 - Скоростные модели, используемые для синтетических тестов: (а) Модель 1 – резкий выступ границы, (б) Модель 2 – вертикальная аномалия, (в) –горизонтальная аномалия.

Рисунок 39 - Истинная скоростная модель, зеленой линией показан рельеф, на котором расположена система наблюдений.

Рисунок 40 - Совокупность годографов первых вступлений.

Рисунок 41 - Результат томографической инверсии, черным цветом – подошва слоя ЗМС и кровля слоя многолетнемерзлых пород в истинной модели, красным – линия изоскорости 1750м/с, зеленым – система наблюдения.

Рисунок 42 - Графики изменения второй нормы абсолютной невязки скоростной модели, а) для первого слоя истинной модели, б) для глубин до кровли многолетнемерзлых пород.

Рисунок 43 - Результат конвертации гладкой скоростной модели в слоистую с однородными слоями 600 м/с, 900 м/с, 1200 м/с, 2400 м/с.

Рисунок 44 - Графики изменения статических поправок. а) величина статической поправки до кровли многолетнемерзлых пород для каждой точки профиля, б) разность статических поправок.

Рисунок 45 - Сопоставление скоростных разрезов ВЧР рассчитанной модели

Рисунок 46 - Времена пробега первых вступлений для: (a) Р-волны, (b) Sволны. Черные линии — наблюдаемые времена пробега, красные линии —

времена пробега рассчитанные для скоростных моделей после томогафической инверсии.

Рисунок 47 - Скоростная модель продольной волны (Vp) по результатам томографической инверсии для различных параметризаций модели: (а) скорость, (b) замедление, (c) чередование, (d) новая параметризация; черные сплошные линии — планируемое местоположение туннеля, пунктирные линии — изолинии скорости для 2000 м/с и 3500 м/с.

Рисунок 48 - Соотношение Vs/Vp по результатам томографии для различных параметризаций модели: (а) скорость, (b) замедление, (c) чередование, (d) новая параметризация; черные сплошные линии — планируемое местоположение туннеля, пунктирные линии — изолинии скорости для 2000 м/с и 3500 м/с, зеленые эллипсы — области низких аномалий Vs/Vp.

Рисунок 49 - Пример сейсмограммы с нанесенными временами первых вступлений, синим – времена «по срыву», оранжевым – времена АО «СНИИГиМС».

Рисунок 50 - Два участка сейсмограммы с нанесенными временами первых вступлений, синим – времена «по срыву», оранжевым – времена АО «СНИИГиМС».

Рисунок 51 - Положение приемников на профиле.

Рисунок 52 - Результат применения метода лучевой томографии, совокупность годографов - сверху, скоростная модель - снизу, пикировка «по фазе».

Рисунок 53 - Скоростная модель ВЧР, черным – лучи рефрагированных волн.

Рисунок 54 - Скоростная модель TomoPlus, пикировка «по фазе».

Рисунок 55 - Результат применения метода лучевой томографии, пикировка «по срыву».

Рисунок 56 - Скоростные модели ВЧР 1-4 соответственно.

Рисунок 57 - Статические поправки за ПВ для скоростных моделей ВЧР 1-4.

Рисунок 58 - Разрезы для моделей ВЧР «8-постоянная скорость от рельефа».

Рисунок 59 - Разрезы для моделей ВЧР «1-не гладкая» и «2-гладкая» (TomoPlus).

Рисунок 60 - Разрезы для моделей ВЧР «3-не гладкая» и «4-гладкая» (ПО «ST3D»).

Рисунок 61 - Скоростные модели ВЧР 5-7 соответственно.

Рисунок 62 - Статические поправки за ПВ для моделей ВЧР 5-7.

Рисунок 63 - Разрезы для моделей ВЧР «5-пикировка СНИИГИМС» и «6пикировка» (TomoPlus).

Рисунок 64. Разрезы для моделей ВЧР «5-пикировка СНИИГИМС, ПО TomoPlus» и «7-пикировка, ПО «ST3D»».