

На правах рукописи



Чернышов Глеб Станиславович

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

1.6.9 – Геофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения РАН.

Научный руководитель:

Дучков Антон Альбертович,

кандидат физико-математических наук, доцент.

Официальные оппоненты:

Ковалевский Валерий Викторович,

доктор технических наук.

Мерецкий Александр Александрович,

кандидат физико-математических наук.

Ведущая организация:

Головной корпоративный научно-исследовательский и проектный институт ПАО «НК «Роснефть» по направлению "Наука в разведке и добыче" (ООО «Тюменский нефтяной научный центр», г. Тюмень)

Защита состоится 25 ноября 2025 г. в 10 час. на заседании диссертационного совета 24.1.087.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН), в конференц-зале.

Отзыв в двух экземплярах, оформленный в соответствии с требованиями Минобрнауки России (см. вклейку), просим направлять по адресу:

630090, г. Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3

факс (8-383) 330-28-07,

e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru

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

<http://www.ipgg.sbras.ru/dissertations/chernyshov2025/dis-Chernyshov.pdf>

Автореферат разослан 16 ноября 2025 г

Ученый секретарь

диссертационного

совета, д.г.-м.н., доцент

8(383)3331629

Неведрова
Нина Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 вибросеймики. 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, t_0' 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 волн, подходом к построению сетки задания скоростной модели, параметризацией модели, подходом к регуляризации задачи, алгоритмом решения системы линейных уравнений. В существующих реализациях алгоритма томографии особенности параметризации 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 Ground Force.

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 распространения 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-сигналов используются данные разведочной сейсморазведки, полученные в рамках опытно-методических работ в южной части Волго-Уральского региона.

Для апробации модифицированного алгоритма лучевой сейсмической томографии используются данные инженерной сейсморазведки, полученные полевым отрядом лаборатории динамических проблем сейсмологии 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. 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.
 - ii. 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.
 - iii. Расчет коррелограмм с применением к виброграммам детерминистической деконволюции по взвешенному сигналу акселерометров с плит вибрационной установки (Ground Force)
- 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.

Автором 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 свип-сигналов. 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 сейсмоки, 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 сейморазведочных 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. Программно реализован алгоритм генерации низкочастотного свип-сигнала для использования при проведении полевых сейморазведочных работ.

Предложена оптимальная методика обработки 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 возможность 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 малоуглубинных 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 - XX 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 4 — 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. Горевячеву, 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., Стеклёнову В.В., Короткову А.Б. за сопровождение исследования и ценные советы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** определяется объект исследования, обосновывается актуальность, ставятся цели и научные задачи, описываются этапы и методология исследования, формулируются защищаемые результаты, научная новизна, а также теоретическая и практическая значимость найденных решений и разработок.

В **главе 1** выполняется краткий аналитический обзор известных современных способов повышения качества вибрационных данных как в направлении расширения полосы частот пилотного свип-сигнала, так и подбора оптимальных процедур обработки исходных данных. Также проводится анализ известных современных алгоритмов построения скоростной модели ВЧР, особенностей их реализации и применения к данным.

Во **второй главе** описывается разработка методики получения и обработки вибрационных данных с подавлением корреляционных помех, выполняется ее апробация при проведении опытно-методических работ на месторождении и обработке реальных данных [Чернышов и др., 2024; Чернышов, 2024].

В **разделе 2.1** приводятся основные этапы стандартной методики обработки вибросейсмических данных. Особенности расчета линейного свип-сигнала и перехода от виброграмм к коррелограммам с помощью корреляции трасс виброграммы с пилотным свип-сигналом. Рассматриваются основные типы помех вибросейсмических данных и причины их возникновения.

В **разделе 2.2** подробно описывается разработка алгоритма генерации низкочастотных свип-сигналов с компенсацией заниженного усилия вибрационных установок на низких частотах. Основным элементом которого служит расчёт функции изменения частоты свип-сигнала от времени его развертки. Выполняется вывод явных формул для расчета функции функции развертки свип сигнала для двух его частей: линейной и нелинейной. При частотах больше частоты выхода на максимальное усилие, вибрационная установка может работать с постоянным усилием

(усилие будет константой). Тогда зависимость времени от частоты развертки будет линейной функцией. На частотах ниже выхода на максимальное усилие изменение времени от частоты будет нелинейным и производная функции изменения времени от частоты (скорость развертки свип-сигнала) будет увеличиваться при увеличении усилия и времени.

В разделе 2.3 выполняется анализ возможности генерации низкочастотных свип-сигналов по данным опытно-методических работ. Данные получены в рамках опытно-методические работы (ОМР) с использованием вибрационных установок Nomad 65Neo в южной части Волго-Уральского региона, включающих две фазы:

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%. Для каждого монохромного сигнала выполнялся перебор усиления установки. Численной метрикой качества возбуждаемых сигналов служил средний уровень нелинейных искажений сигнала Ground Force.

ФАЗА 2. Тестирование НЧ свип-сигналов для проверки эффективности возбуждения низких частот в целевых сигналах. Тестирование включало: отработку одного пункта возбуждения (ПВ) с набором НЧ свип-сигналов для оценки возможности получения исходных данных при различных параметрах НЧ свип-сигналов; отработку площади (40 ПВ) с одним НЧ свип-сигналом для оценки возможности получения суммированного разреза.

Также проводится 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 1 показана коррелограмма для линейного свип-сигнала (вверху) и НЧ свип-сигнала (внизу), красные точки – времена, снятые с коррелограммы для линейного свип-сигнала, синим точки – для НЧ свип-сигнала.

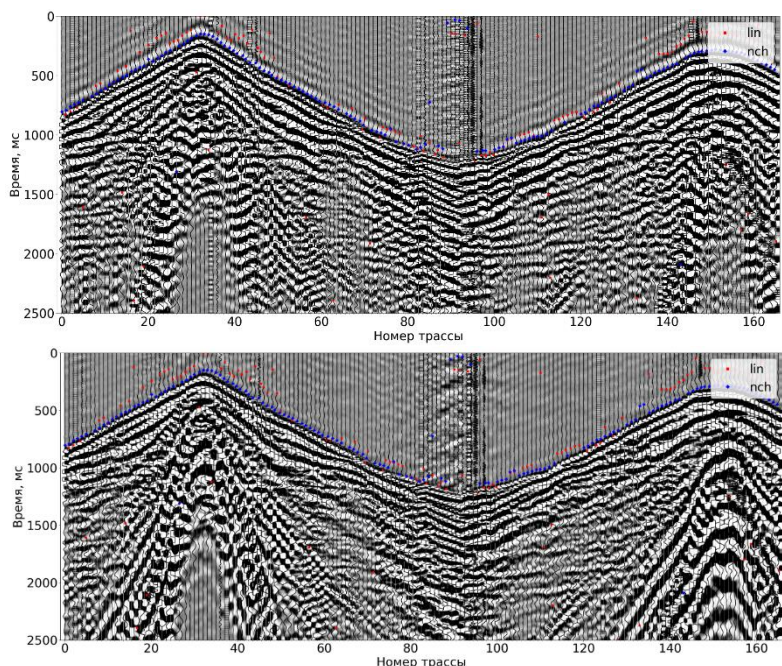


Рисунок 1 – Коррелограммы со снятыми временами первых вступлений: для линейного свип-сигнала (вверху), для НЧ свип-сигнала, красные точки –времена, снятые с коррелограммы для линейного свип-сигнала, синие точки – для НЧ свип-сигнала

По результатам анализа данных ОМР сделаны следующие выводы:

1. Предложенный в разделе 2.2 алгоритм построения НЧ свип-сигналов является корректным и реализуемым для современных виброисточников на примере источника NOMAD 65 Neo.
2. 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. Кроме повышения качества генерируемых НЧ свип-сигналов это позволит уменьшить длительность НЧ свип-сигналов для заданного интервала частот. Для рассмотренного конкретного случая удастся сгенерировать эквивалентный НЧ свип-сигнал, который будет короче на 5 %, что приведет к пропорциональному сокращению длительности полевой съемки.

В разделе 2.4 описывается подход к переходу от виброграмм к коррелограммам с применением детерминистической деконволюции по сигналу Ground Force. Показано, что применение стандартного подхода с корреляцией трасс виброграммы с пилотным свип-сигналом будет приводить к помехам в волновом поле, связанных с наличием гармонических помех в регистрируемом сигнале. Демонстрируется некорректность использования для корреляции сигнала приближенного к реальному (на примере сигнала Ground Force), связанную с наличием гармонических помех возбуждаемом сигнале.

В ходе тестирования рассматриваются следующие варианты получения коррелограмм с использованием:

- корреляции с пилотным свип-сигналом;
- деконволюции с пилотного свип-сигналом;
- деконволюции со свип-сигналом, приближенным к фактическому, который рассчитывался по методу [Фиников, Шалашников, 2021];
- деконволюции с Ground Force.

Ко всем коррелограммам, полученным в результате деконволюции, применялась полосовая фильтрация в частотном диапазоне пилотного свип-сигнала. 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 Ground Force, который позволил снизить уровень корреляционных шумов в 3 раза. Деконволюция с пилотным свип-сигналом понижает уровень корреляционных шумов в 1.1 раз, деконволюция с рассчитанным свип-сигналом – в 2 раза.

В главе 3 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 [Chernyshov et al., 2022].

В разделе 3.1 подробно описывается стандартная постановка задачи лучевой сейсмической томографии и ее модификация для возможности выбора параметризации модели через умножение томографической матрицы на весовую. Весовая матрица соответствует масштабированию пространства параметров модели, что является частной формой правого предобуславливания. В данном случае для масштабирования параметра модели δV_n в n -й ячейке используются значения начальной скоростной модели в этой же ячейке V_{0n} в разной степени σ . Так как в начальной модели скорость растет с глубиной, то данное взвешивание влияет на чувствительность аномалий на разных глубинах к данным (невязкам времен). Стандартные параметризации модели через скорость и медленность соответствуют весовой матрице с $\sigma=2$ и $\sigma=0$ соответственно.

Приводится описание всех этапов, модифицированного алгоритма томографической инверсии.

В разделе 3.2 выполняется верификация модифицированного алгоритма на серии синтетических тестов, включающих системы наблюдения характерные для инженерной и нефтегазовой сейсморазведки.

Для всех синтетических тестов в этом разделе использовалось 10 итераций линеаризованной томографической инверсий. Оптимальные регуляризирующие параметры 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).

Проводится сравнение трех разных параметризаций модели σ . При использовании разных параметризаций σ для одной и той же модели регуляризирующие параметры α и ϵ идентичны.

Для первого синтетического теста использовалась истинная скоростная модель типа «шахматной доски». Скорость в модели растет с глубиной по закону $(300+40 \cdot (z-z_0))$ м/с ($z_0=-10$ м). На эту градиентную модель наложены аномалии аномалиями скорости в виде «шахматной доски» (рисунок 2а). 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 $2 \times 2,5$ м;
- глубинная область с размерами аномалий 15×10 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 2а. Расчет синтетических данных был проведен для точной модели (Рисунок 2а) тем же алгоритмом численного решения уравнения эйконала. Размер вычислительной сетки для расчета времен и лучей составляет 0.1x0.2 м.

Размер томографической прямоугольной сетки составляет 1x2 м, параметры демпинга и сглаживания 15. На Рисунке 35 приведены результаты томографической инверсии для нескольких параметризаций модели:

1. параметризация скоростью ($\sigma=2$) на Рисунке 2б;
2. параметризация медленностью ($\sigma=0$) на Рисунке 2в;
3. промежуточная параметризация ($\sigma=1$) на Рисунке 2г.

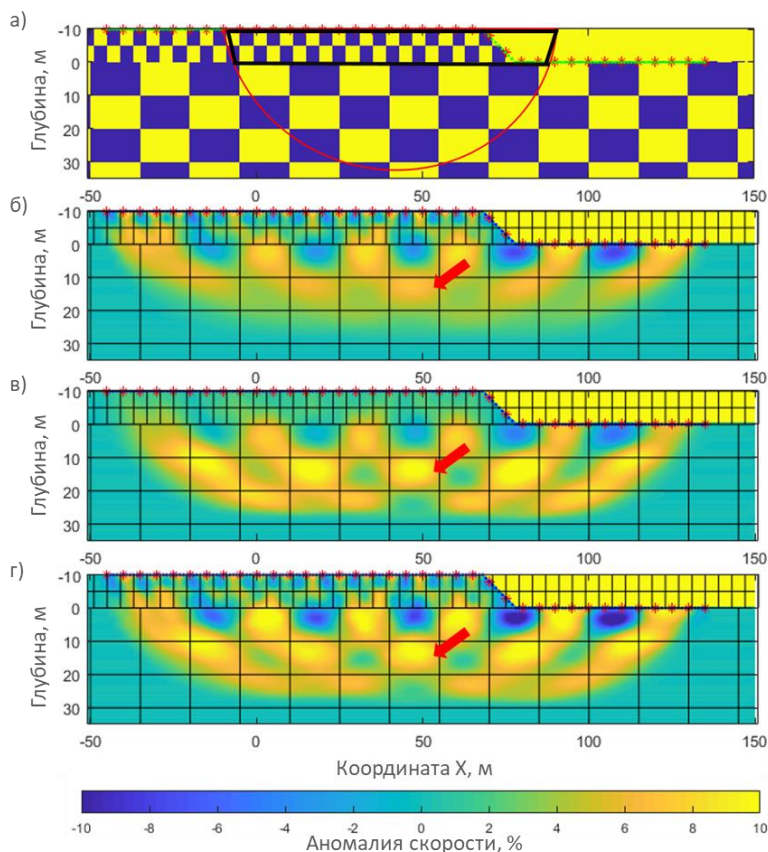


Рисунок 2 – Тест «шахматной доски» для сравнения результатов томографической инверсий для разных параметризаций модели: (а) истинные аномалии скорости, (б) восстановленные аномалии для параметризации скорости, (в) для параметризации медленностью ($\sigma=0$), (г) для новой параметризации ($\sigma=1$); черная рамка – приповерхностная область, красная рамка – глубинная область

Из рисунка видно, что параметризация скорости ($\sigma=2$) дает лучшие результаты для приповерхностной области (лучше восстанавливаются маленькие прямоугольники), но качество инверсии ухудшается в более глубинной области модели. Параметризация медленности ($\sigma=0$) дает лучшие результаты для более глубинной области, но качество инверсии ухудшается в приповерхностной области. Новая промежуточная параметризация ($\sigma=1$) 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. Результирующие невязки времен прихода составили менее 1 мс для всех параметризаций. Показано, что новая параметризация ($\sigma=1$) дает оптимальный результат для модели целиком. Для нее метрика в приповерхностной области модели оказывается очень близка к параметризации скоростью, а метрика в глубинной части модели оказывается очень близка к параметризации медленностью.

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.

Для второго теста использовалась модель шахматной доски со сглаженными аномалиями. Система наблюдения, фоновый линейный градиент скорости и размер аномалий такие же, как и в предыдущем тесте. Развивая идею подбора оптимальной параметризации модели проводится серия томографических инверсий с более дробным шагом по σ от 0 до 3. Для сравнения результатов томографии была использована численная метрика среднеквадратической относительной ошибки для двух областей (рисунок 3). Что подтверждает выводы сделанные для модели с резкими аномалиями.

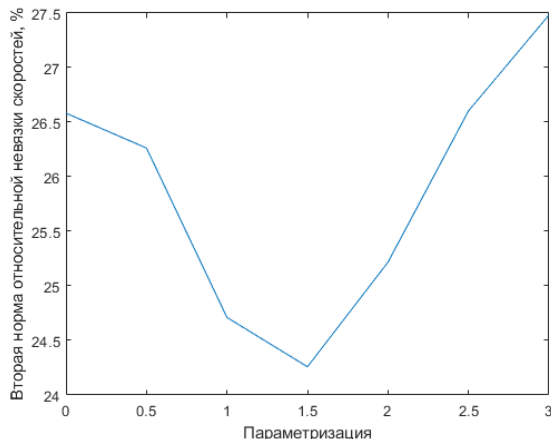


Рисунок 33 – Сумма относительной погрешности построения скоростной модели на разных глубинах в зависимости параметризации (σ)

Синтетические модели также включали различные параметры системы наблюдения (2D/3D), форму, глубину и амплитуду аномалий. Численные метрики качества получаемых скоростных моделей для разных параметризаций согласуются с предыдущими выводами.

В **разделе 3.3** выполняется верификация модифицированного алгоритма на двух наборах реальных данных, включающих системы наблюдения инженерной и нефтегазовой сейсморазведки.

Система наблюдения инженерной сейсморазведки 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 (25x40 см). Возбуждение в каждой точке включало два удара в противоположных направлениях перпендикулярно сейсмическому профилю. Записи противоположных ударов вычитались для подавления Р-волн и усиления S-волн. Выполнена томографическая инверсия времен пробега Р- и S-волн для четырех параметризаций модели: параметризация скорости, параметризация медленности, чередование (скорость/медленность) параметризаций, параметризация $\sigma=1$.

По результатам анализа результатов сделаны следующие выводы: параметризации скоростью, медленностью, чередованием приводят к скоростным моделям плохо согласующимися с априорной геологической информацией о структуре зон обводненных пород, при этом промежуточная параметризация $\sigma=1$ обеспечивает минимальные несоответствия времени пробега и не противоречит геологическим предположениям.

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

По результатам верификации алгоритма на малоглубинных и разведочных данных сделаны общие 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 ($\sigma=2$). Когда ожидаются только глубокие аномалии, можно выбрать параметризацию медленности ($\sigma=0$). В общем случае параметризация ($\sigma=1.5$) обеспечивает оптимальные результаты с хорошим разрешением восстановленных аномалий скорости на всех глубинах в пределах региона с хорошим лучевым покрытием.

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 Ground force 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 Ground Force. 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.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК

1. Procedure and evidence of seismic research into physical properties of cohesive soils / Kurlenya M. V., Serdyukov A.S., Chernyshov G.S. [et al.] // Journal of Mining Science. – 2016. – Т. 52. – №. 3. – P. 417-423. (K1)
2. Procedure and results of seismic investigations into causes of landslides in permafrost rocks / Kurlenya M. V., Chernyshov G.S. [et al.] // Journal of Mining Science. – 2016. – Т. 52. – №. 5. – P. 835-841. (K1)
3. The effect of near-surface azimuthal anisotropy on a joint interpretation of seismic and electrical resistivity data / S.V. Yaskevich, P.A. Dergach, G.S. Chernyshov [et al.] // Near Surface Geophysics. – 2022 – V. 20. – N 3. – P. 279-291. (K1)
4. 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. – Т. 20. – №. 2. – P. 135-146. (K1)

Другие публикации и лично доложенные материалы конференций

5. Чернышов Г. С. Применение метода волновой томографии для обработки данных малоглубинной сейсморазведки / Чернышов Г. С., Дучков А. А., Сердюков А. С. // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. – 2017. – Т. 2. – №. 4. – С. 90-94.
6. Чернышов Г. С. Способы задания начальной модели для восстановления слоисто-неоднородных скоростных моделей методом лучевой томографии / Чернышов Г. С., Дучков А. А., Никитин А. А. // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2018. – Т. 4. – С. 256-263.
7. Чернышов Г. С. Подход к автоматизации этапов обработки сейсморазведочных данных метода преломленных волн / Чернышов Г. С., Карпухин В. И. // Геофизические технологии. – 2020. – С. 28.
8. Chernyshov G.S. Model-parameterization scaling for improving accuracy of seismic tomography in reconstructing near-surface velocity model / Chernyshov G., Duchkov A., Kulakov I. // EAGE. 26th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Held at Near Surface Geoscience (7 - 8 December, 2020). – 2020

9. Изучение строения верхней части разреза в условиях азимутальной анизотропии / Яскевич С. В., Дергач П.А., Чернышов Г.С. и др. // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. недропользование. горное дело. направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. экономика. геоэкология. – 2020. – С. 759-768.
10. Влияние параметризации скоростной модели на результаты сейсмической томографии / Чернышов Г. С. и др. // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология. – 2020. – С. 701-709.
11. Построение скоростной модели по данным рефрагированных волн для учета неоднородной ВЧР / Чернышов Г.С. и др. // Интеллектуальный анализ данных в нефтегазовой отрасли. Вторая региональная конференция EAGE в России и странах СНГ (Новосибирск, Россия, 4-6 августа 2021 г.). – 2021. – С.
12. Изучение анизотропии ВЧР на полигоне ключи методом преломленных волн / Яскевич С. В., Дергач П.А., Чернышов Г.С., и др. // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2021. – Т. 2. – №. 3. – С. 90-97.
13. Serdyukov A. S. New methods for signal digital processing to determine the parameters of seismic wave propagation models / Serdyukov A. S., Yablokov A. V., Chernyshov G. S. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2021. – Т. 773. – №. 1. – Р. 012-019.
14. 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.
15. Оценка эффективности методов обработки виброграмм / Чернышов Г.С., Литвиченко Д.А., Дучков А.А., Стеклёнов В.В. // ПроГРРесс-23. Геологоразведка как бизнес: Сборник материалов 3-й международной научно-практической конференции (Сочи, 23-25 октября 2023 г.) – ООО "Геомодель" – М. – С. 79-83 – 2023
16. Портативный вибрационный источник для задач инженерной сейсморазведки / Дергач П.А., Яблоков А.В., Полозов С.С., Чернышов Г.С. // Инженерная и рудная Геофизика 2023. – 2023. – С. 677-682.
17. Анализ эффективности методов подавления помех вибрационных данных / Чернышов Г. С. [и др.] // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. – 2024. – Т. 9. – №. 3. – С. 17-25.
18. 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.

19. Чернышов Г.С. Методы возбуждения низкочастотных свип-сигналов в сейсморазведочных работах / Чернышов Г.С., Литвиченко Д.А., Дучков А.А. // Интерэкспо ГЕО-Сибирь - XX 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: СГУГиТ, 2024. – Т. 2. – № 4. – С. 182-188.
20. Чернышов Г.С. nSeisLab: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / Чернышов Г.С., Яблоков А.В. // Св-во о регистр. прогр. 2019618979; RU; № 2019617513, заявл. 21.06.2019, опубл. 08.07.2019.
21. Чернышов Г.С. TomoRefr3D: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / Чернышов Г.С., Никитин А.А., Матвеев А.С., Литвиченко Д.А. // Св-во о регистр. прогр. 2019665753; RU; № 2019664881, заявл. 21.11.2019, опубл. 28.11.2019
22. 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.