

На правах рукописи



ГОРЕЯВЧЕВ Никита Алексеевич

**АЛГОРИТМ КОРРЕКЦИИ СИГНАЛОВ
ПЛОЩАДНОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ
МЕТОДОМ ФАКТОРНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ
С ВВЕДЕНИЕМ ПСЕВДОАПРИОРНОЙ
ИНФОРМАЦИИ**

1.6.9 – Геофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических 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:

Митрофанов Георгий Михайлович,

доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики Сибирского отделения РАН.

Официальные оппоненты:

Долгих Юрий Николаевич,

доктор геолого-минералогических наук, ученый секретарь ООО «НОВАТЭК НТЦ».

Фатьянов Алексей Геннадьевич,

доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет» (г. Тюмень).

Защита состоится 25 ноября 2025 г. в 14 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 одном экземпляре, 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/gorejavchev2025/Dis-Gorejavchev.pdf>

Автореферат разослан 15 октября 2025 г.

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



Неведрова
Нина Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Объект исследования – метод факторного разложения и его программно-алгоритмическое обеспечение при решении задач определения корректирующих слагаемых и множителей при оценке остаточных статических времен, амплитуд, формы сигнала в условиях неоднородной верхней части геологического разреза (ВЧР).

Актуальность темы исследования. Развитие программно-алгоритмических основ метода факторного разложения (декомпозиции) одна из актуальных задач в современной сейсморазведке. В условиях растущего объёма данных сейсморазведочных работ, в том числе высокоплотных [Alexander et al., 2017; Bekeshko et al., 2021], возникает острая необходимость в их быстрой и точной обработке. Алгоритмы и их программная реализация, разработанные в 70-х годах и основанные на итерационных методах [Гольдин, Митрофанов, 1975; Митрофанов, 1978; Taner, Koehler, 1981], в настоящее время не обладают достаточной степенью точности получаемого результата, особенно в случаях, когда сейсмические данные включают длиннопериодные вариации (вариации, период которых превышает длину расстановки более чем в 1.5 раза) [Mitrofanov, Goreyavchev et al., 2019; 2021; 2022; Mitrofanov et al., 2019]. При этом в большинстве современных решений используются именно итерационные методы [Feng et al., 2011; Faquan, 2011; Давлетханов, 2014; Давлетханов, Силаенков, 2016; Kazemi, 2016; Давлетханов, 2017; Митрофанов, Горевячев, 2017; Gülünay, 2017], что указывает на необходимость поиска новых решений. Задачи, решаемые методом факторного разложения в обработке сейсмических данных, традиционно определяются в поверхностно-согласованной постановке, т.е. предполагается приведение условий возбуждения и приёма сейсмического сигнала к идеальным поверхностным условиям – одной поверхности (по кинематическим (времена) или динамическим (амплитуда, форма сигнала) характеристикам).

Современные вычислительные ресурсы открывают новые возможности для обработки значительных объёмов сейсмических данных, что ранее было недостижимо из-за ограниченных мощностей. В связи с этим алгоритмы, основанные на прямом решении систем линейных уравнений, становятся перспективным направлением, особенно благодаря возможности включения априорной информации. В отличие от итерационных методов, такие алгоритмы обеспечивают решение с высокой точностью за счет обращения матрицы системы линейных уравнений, что особенно важно при работе с большими массивами

данных и сложными сейсмическими сигналами [Гореявчев, 2016; 2018; Кушнарев, Гореявчев и др., 2018а; 2018б].

В качестве априорной информации при обработке сейсмических данных могут быть использованы значения микросейсмокаротажа (МСК) или данные о форме сигнала, полученные при вертикальном сейсмическом профилировании (ВСП). Однако объёмы априорной информации, необходимой для корректного решения задачи, в частности, для устранения длиннопериодных вариаций в данных, оказываются чрезвычайно большими, особенно в случае площадной сейморазведки. Это делает проведение исследований МСК практически невозможным из-за их высокой стоимости. Возможный переход к использованию псевдоаприорной информации, обеспечивающей фиксацию неоднозначно определяемые компоненты в данных, представляет собой вариант минимизации количества априорных данных. Псевдоаприорная информация является чисто математическим объектом, но в ней имеется и физический смысл, заключающийся в приведении наблюдений к некоторым идеальным условиям проводимого геофизического эксперимента. Эти условия обеспечиваются, например, на плоских или наклонных поверхностях. Такой подход не только компенсирует недостаток информации, но и повышает точность решений за счёт корректной оценки длиннопериодных компонент в сейсмических данных [Митрофанов, Гореявчев и др., 2023б].

Полученные ранее решения на основе прямого обращения с возможностью внесения псевдоаприорной информации ограничиваются профильными данными [Митрофанов, 1975; Cambois, Stoffa, 1992; van Vossen, Trampert, 2007]. При этом для площадных данных решение так и не было найдено. Однако сейчас разработка алгоритмов поверхностно-согласованной коррекции сигналов на базе прямого обращения матрицы системы линейных уравнений открывает новые возможности для повышения точности, а в некоторых случаях и скорости обработки площадных сейсмических данных.

Цель исследования – развитие программно-алгоритмической составляющей метода факторного разложения дополнением системы линейных уравнений псевдоаприорной или априорной информацией для повышения точности решения обратной задачи по данным площадной сейморазведки, а именно определения корректирующих слагаемых и множителей при оценке остаточных статических времен, амплитуд, формы сигнала в условиях неоднородной ВЧР.

Научная задача – разработать и программно реализовать алгоритм поверхностно-согласованной коррекции кинематических (остаточных статических времён) и динамических характеристик (амплитуд, формы

сигнала) по данным профильной 2D и площадной 3D сейсморазведки методом факторного разложения.

Этапы исследования

1. Аналитический обзор известных из публикаций алгоритмов коррекции сейсмических сигналов на основе метода факторного разложения с целью повышения точности решения обратной задачи в условиях неоднородной ВЧР.

2. Разработка алгоритма поверхностно-согласованной коррекции кинематических и динамических характеристик сейсмических сигналов для обработки больших объемов данных площадной 3D сейсморазведки с применением итерационных и матричных методов решения систем линейных уравнений.

3. Выполнение численных экспериментов для проверки работоспособности алгоритма на различных типах факторных моделей, таких как двухфакторные, трехфакторные и четырехфакторные.

4. Создание научно-исследовательской версии программного обеспечения, реализующего предложенный алгоритм для обработки 2D профильных и 3D площадных сейсмических данных.

5. Тестирование разработанного алгоритма для решения разных типов задач (поверхностно-согласованной коррекции остаточной статистики, поверхностно-согласованной коррекции амплитуд; поверхностно-согласованной деконволюции).

6. Апробация разработанного алгоритма при обработке реальных сейсмических данных (инженерные морские профильные данные, наземные площадные данные).

7. Исследование области применения итерационного и матричного вариантов реализации алгоритма при решении задач поверхностно-согласованной коррекции амплитуд и деконволюции.

Теория, методы исследования, фактический материал, программное обеспечение

Теоретической основой решения поставленной задачи являются:

- теория дисперсионного анализа и базирующийся на ней метод факторного разложения; используется для вычисления факторов по экспериментальным данным;

- свёрточная модель сейсмического сигнала, которая используется как основа для вычисления модельных данных, проведения численных экспериментов и включает влияние импульсного источника, характеристик геологической среды, сейсмического приёмника и изменений характеристик сигнала с удалением;

- современный математический аппарат линейной алгебры, а именно решение систем линейных уравнений при помощи итерационных

(метод Гаусса-Зейделя, метод LSQR, метод BICGSTAB, в том числе с использованием предобуславливателей) и матричных методов (разложение Холецкого, вычисление псевдообратной матрицы с использованием SVD-разложения).

Для оценки динамических характеристик сигнала используются методы:

- оценки спектральных характеристик сейсмического сигнала на основе быстрого преобразования Фурье;
- построения корректирующих фильтров во временной области.

Для работы с большими объемами сейсмических данных и хранения больших матриц используется разреженный формат данных. Алгоритм реализован на языке программирования Python с использованием библиотек `scipy` и `numpy` с лицензией свободного программного обеспечения BSD (Berkeley Software Distribution).

Апробация разработанного алгоритма выполнена на реальных данных инженерной морской сейсморазведки (полученных соискателем в 2015 году в ходе Беломорской геофизической практики МГУ совместно с к.т.н. Токаревым М.Ю. и к.т.н. Пироговой А.С.), а также на анонимизированных данных площадной наземной сейсморазведки, предоставленных партнёрской организацией. Точность и скорость работы разработанного алгоритма оценивались в сравнении с промышленным пакетом обработки сейсмических данных Geovation по академической лицензии.

Защищаемый научный результат

Алгоритм поверхностно-согласованной компенсации кинематических и динамических характеристик данных профильной 2D и площадной 3D сейсморазведки с дополнением системы линейных алгебраических уравнений псевдоаприорной/априорной информацией и его программная реализация.

Научная новизна

Найдено новое решение задачи поверхностно-согласованной коррекции сейсмических сигналов методом факторного разложения на основе прямого матричного обращения для профильных 2D и площадных 3D сейсмических данных:

- для обеспечения единственности и устойчивости решения системы линейных уравнений с использованием полиномиального разложения факторов определено количество и тип неоднозначно определяемых компонент (констант, линейных и параболических составляющих), необходимых для разных типов факторных моделей для площадной 3D сейсморазведки;

- с использованием разложения Холецкого в качестве решателя и внесения дополнительных уравнений (псевдоаприорной информации в виде фиксации констант, линейных и параболических составляющих) в систему линейно-алгебраических уравнений (СЛАУ) – с высокой точностью получены оценки длиннопериодных вариаций в сейсмических сигналах для профильной 2D и площадной 3D сейсморазведки в поверхностно-согласованной постановке.

Личный вклад

Соискателем разработаны и реализованы в виде научно-исследовательской версии программного продукта алгоритма факторного разложения и решения задачи поверхностно-согласованной коррекции сейсмических сигналов и его составляющие:

- для работы с профильными 2D данными – в итерационной и матричной постановке;
- для работы с площадными 3D данными – в итерационной и матричной постановке;
- для деконволюции – на основе матричного метода и разложения Холецкого.

Выполнен сравнительный анализ результатов итерационного и матричного методов, сделан вывод о границах применимости каждого из них при решении задач в поверхностно-согласованной постановке (итерационный метод – для поверхностно-согласованной коррекции амплитуд и остаточных времен по данным площадной 3D сейсморазведки, матричный метод – для всех типов задач по данным профильной 2D сейсморазведки и деконволюции по данным площадной 3D сейсморазведки).

Численными экспериментами по синтетическим данным, полученным по факторным представлениям для различных типов моделей, определена связь между точностью оценки длиннопериодных вариаций и типом сейсмической расстановки при использовании итерационного метода.

Выполнено сопоставление результатов работы алгоритма с результатами из известного производственного пакета обработки сейсмических данных (Geovation) на морских (инженерных данных, полученных в акватории Белого моря соискателем в ходе прохождения геофизической практики МГУ) и наземных данных.

Теоретическая и практическая значимость работы

Достоинством разработанного алгоритма (матричной реализации) является возможность внесения псевдоаприорной/априорной информации непосредственно в ходе получения решения системы линейных уравнений. Это позволяет с высокой точностью получить оценки

вариаций длиннопериодных компонент в сейсмических сигналах. Это особенно важно, если априорной информации недостаточно или она отсутствует. В таких случаях псевдоаприорная информация становится ключевым инструментом для повышения устойчивости и надежности результатов оценки вариаций в сейсмических сигналах.

Важную роль в итерационном методе играет связность системы сейсмических наблюдений: чем меньше связность наблюдений между собой, тем ниже скорость сходимости итеративного решателя. Поэтому при наиболее "вытянутых" системах, где наблюдения распределены неравномерно или имеют слабую взаимосвязь, более эффективным по точности получаемых оценок оказывается матричный подход, поскольку он не зависит от плана наблюдений и обеспечивает стабильность результатов независимо от геометрии расстановки.

Еще одним преимуществом алгоритма в матричной реализации в сопоставлении с итерационными реализациями является его эффективность при решении задачи поверхностно-согласованной деконволюции за счет высокой скорости и точности получаемого решения. Это преимущество достигается благодаря использованию единого решателя, а именно разложения матрицы методом Холецкого один раз с последующим перемножением с векторами правых частей, в отличие от итерационного метода, где требуется запускать решатель независимо для каждой частоты спектра, что значительно увеличивает вычислительные затраты и время поиска решения соизмеримой точности.

Публикации

Результаты по теме диссертации изложены в 23 печатных изданиях, из которых 6 — в рецензируемых научных журналах (2 из них рекомендованы перечнем высшей аттестационной комиссии (ВАК)), 17 — в сборниках трудов конференций. На разработанный алгоритм и его программные составляющие получено 4 свидетельства о государственной регистрации программ ЭВМ.

Достоверность

Высокая достоверность результатов реализации алгоритма поверхностно-согласованной коррекции сейсмических сигналов (матричный и итерационный способ), построенных на основе факторного разложения, определялась путем математического моделирования, а также сравнения с результатами, полученными на аналогичных реализациях из промышленного пакета обработки (Geovation). Основные результаты работы представлены на международных и российских конференциях. Исследование поддерживалось грантом РФФИ 19-35-90087 «Применение факторного разложения при анализе и учете изменений сейсмических сигналов».

Объём и структура работы

Диссертация состоит из введения, трёх глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 125 страниц с 65 рисунками. Список литературы содержит 95 наименований.

Благодарности

Автор глубоко признателен своему научному руководителю, доктору физико-математических наук Г.М. Митрофанову за участи и поддержку в решении разных вопросов и постановку научной задачи

Автор выражает благодарность заведующему лабораторией динамических проблем сейсмики к.ф.-м.н. А.А. Дучкову за неизменную поддержку, конструктивную критику и ценные рекомендации, которые способствовали успеху исследования.

Благодарность за профессиональную помощь автор выражает своим близким коллегам Г.С. Чернышову, А.С. Матвееву, к.ф.-м.н. А.В. Яблокову и к.г.-м.н. А.В. Арфьеву. Автор благодарит коллег к.ф.-м.н. С.А. Соловьева, д.ф.-м.н. Ю.И. Колесникова, к.ф.-м.н. С.В. Яскевича, к.т.н. С.Б. Горшкалёва, В.В. Карстена, к.г.-м.н. Т.В. Нефёдкину, д.ф.-м.н. М.И. Протасова, д.ф.-м.н., профессора, В.А. Чеверду, д.г.-м.н. В.Д. Суворова за критику и ценные советы, которые стали важным вкладом в развитие исследования.

Автор благодарит коллег из Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова к.т.н. Токарева М.Ю. и к.т.н. Пирогову А.С. за возможность личного участия в морском сейсмическом эксперименте и получении профильных инженерных морских данных, без которых было бы невозможно провести апробацию алгоритма.

Автор искренне благодарен В.И. Самойловой за многолетнюю поддержку, постоянное внимание и методическую помощь в подготовке материалов диссертации.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** определяется объект исследования, обосновывается актуальность, ставится цель и научная задача исследования, описываются этапы и методология исследования, формулируется защищаемый научный результат и новизна, а также теоретическая и практическая значимость работы.

В **главе 1** представлен обзор современных разработок, связанных с применением факторного разложения для решения задач коррекции кинематических и динамических характеристик в поверхностно-согласованной постановке с использованием новых подходов в подготовке входных данных или постобработке результатов.

Так, в работах авторов Cary и Nagarajappa [Cary, Nagarajappa, 2013; Nagarajappa, Cary, 2015] выполняется оценка сигнала в условиях шума с использованием взаимной корреляции для повышения точности вычисления сигнальной составляющей. Использование помехоустойчивой деконволюции в работе авторов Kirchheimer и Ferber [Kirchheimer, Ferber, 2001] позволяет эффективно обрабатывать данные с нерегулярным шумом, сохраняя истинные амплитуды, а подходы на основе z-преобразования [Kazemi et al., 2016] расширяют возможности поверхностно-согласованной деконволюции, обходя требование к минимальной-фазе входного сигнала. Кроме того, обработка преломлённых волн в работе Colombo и соавторов [Colombo et al., 2016; 2018; 2021] с использованием специальных сортировок значительно повышает точность оценки статики и построения скоростных моделей.

Однако в публикациях имеются. Генетический алгоритм для решения задачи поверхностно-согласованной коррекции остаточной статики в нелинейной постановке в работе Aleardi [Aleardi et al., 2016] требует значительных вычислительных ресурсов, даже в случае работы с профильными инженерными данными, и ограничен в применении для задач разведочной геофизики. Несмотря на достоинства, методы оценки сигнала в условиях шума [Cary, Nagarajappa, 2013; Nagarajappa, Cary, 2015] оказываются неэффективными при низкой кратности данных или низком соотношении сигнал/шум. Линеаризованная модель амплитуд, предложенная Baek и соавторами [Baek et al., 2019], требует ручного подбора весов в задаче поверхностно-согласованной коррекции и дополнительного моделирования.

Для современных подходов к поверхностно-согласованной коррекции сейсмических сигналов характерен значительный прогресс, особенно в области помехоустойчивости. Однако многие из них остаются ограниченными для площадных данных. Кроме того, недостаточно исследуются математические методы решения системы линейных уравнений в задаче поверхностно-согласованной коррекции сигналов. Такие исследования необходимы для учёта специфики задач площадной сейморазведки и обеспечения высокой точности и скорости вычислений.

Во **второй** главе описывается разработка алгоритма поверхностно-согласованной коррекции сигналов с внесением дополнений в систему линейных уравнений в виде псевдоаприорной или априорной информации для обеспечения единственности и устойчивости решения. Контроль введения дополнения осуществляется SVD-разложения. Верификация и тестирование алгоритма выполняется на модельных данных для разных типов факторных моделей.

В **разделе 2.1** описывается формирование системы линейных уравнений и ее матричная форма для задачи поверхностно-согласованной коррекции сейсмических сигналов. Матрица характеризуется плохими вычислительными свойствами: вырожденность, плохая обусловленность, переопределенность. Для обеспечения точного решения задачи предложены 3 способа введения априорной информации в матрицу системы линейных уравнений: введение априорной информации в результат, полученных итеративным методом; решение расширенной системы уравнений с включением априорной информации; использование псевдоаприорной информации для получения решения с последующим дополнением априорной информацией. Последний способ является оптимальным в случае недостатка априорной информации и необходимости получения решения прямым решателем.

В **разделе 2.2** описаны подходы для устранения плохой обусловленности матрицы системы линейных уравнений: усечением краевых наблюдений и дополнение. Усечение краевых наблюдений является обязательным условием для обеспечения единственности решения, поскольку такие наблюдения часто являются малократными, что приводит к ситуации, когда на несколько неизвестных факторов приходится одно известное наблюдение, делая уравнения такого рода неразрешимыми. Для дополнения используется псевдоаприорная информация: в дополнительных уравнениях фиксируются значения неоднозначно определяемые компонент – констант и линейных составляющих для устранения вырожденности матрицы и решения системы уравнений прямым методом. Для контроля введения псевдоаприорной информации и устранения вырожденности в **разделе 2.3** используется метод SVD-разложения. На основе результатов SVD-разложения сделан вывод, что ухудшение обусловленности матрицы происходит при недозаполненности плана сейсмических наблюдений, особенно при увеличении длины профиля (Рисунок 1) [Горяевчев, Митрофанов, 2018].

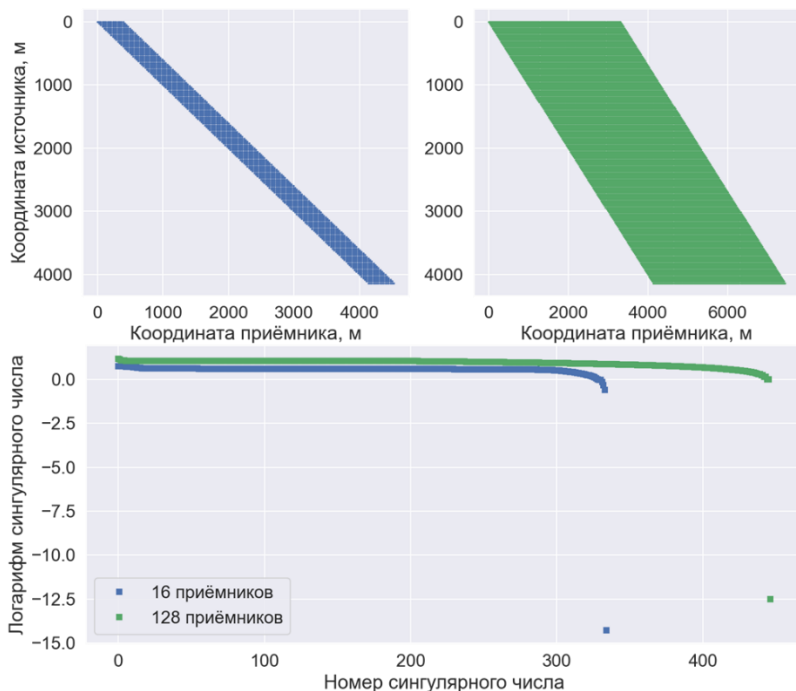


Рисунок 1 – Два типа систем наблюдения и значения сингулярных чисел матрицы в задаче факторного разложения. Верхний рисунок – два типа систем наблюдения с разным числом приемников и нижний рисунок – значения сингулярных чисел для них.

В разделе 2.4 верифицируется алгоритм поверхностно-согласованной коррекции сейсмических сигналов численными экспериментами. Сравниваются методы решения (итерационные – LSQR и BICGSTAB и прямой метод на основе разложения Холецкого) с точки зрения точности, скорости и устойчивости. Рассматриваются варианты дополнения матриц (как прямоугольной, так и квадратичной форм) псевдоаприорной информацией для обеспечения единственности решения, а также влияние структуры матриц на скорость вычислений. Реализация алгоритма на синтетических данных для профильных и площадных систем сейсмических наблюдений показывает, что прямое решение оказывается эффективнее для задач, требующих многократного запуска итерационного решателя (поверхностно-согласованная деконволюция). Результаты тестирования показывают, что ускорение

решения с помощью итерационных методов достигается с использованием предобуславливателей, но по-прежнему не опережает по скорости и точности решения на основе прямого метода.

В качестве альтернативы в **разделе 2.5** для устранения неоднозначно определяемых компонент (т.е. для сокращения количества дополнительных уравнений) рассматривается метод супербинирования, применяемый в площадных системах сейсмических наблюдений путем объединения бинов ОГТ (общей глубинной точки) в супербины. Метод улучшает вычислительные свойства матрицы, но является эвристическим, не полностью устраняет неоднозначно определяемые компоненты и приводит к потере полезной информации.

Разработан и программно-реализован алгоритм поверхностно-согласованной коррекции сейсмических сигналов, включающий следующие шаги:

1. Подготовка входных данных для решения трех типов поверхностно-согласованных задач в пределах заданного временного интервала:

- с использованием функции взаимной корреляции рассчитываются остаточные статические времена по сейсмограммам с введенными кинематическими поправками (для коррекции остаточной статики);

- рассчитываются и логарифмируются значения среднеквадратичных амплитуд (для коррекции амплитуд) для каждой из сейсмических трасс;

- с использованием функции автокорреляции рассчитываются и логарифмируются значения амплитудных спектров для каждой из сейсмических трасс (для деконволюции).

2. Задается тип факторной модели для расчёта вариаций значений времен, амплитуд, амплитудных спектров в сейсмических сигналах.

3. С учётом расположения источников, приёмников и заданного типа факторной модели определяется матрица системы линейных уравнений с входными данными из п.1.

4. По типу задачи и размерности данных выбирается метод – итерационный или матричный.

Для итерационного метода система линейных уравнений решается методом LSQR для оценки вариаций в сейсмических данных.

Для матричного метода

- используется квадратичная форма матрицы (метод наименьших квадратов);

- матрица дополняется псевдоаприорной информацией, которая определяется по разложению факторов на полиномы, для обеспечения единственности и устойчивости решения;

- контроль введения псевдоаприорной информации осуществляется SVD-разложением и локализацией малых сингулярных чисел;

- разложение дополненной матрицы выполняется методом Холецкого для симметричных положительно определенных матриц для решения системы линейных уравнений и оценки вариаций в сейсмических данных.

5. По полученным вариациям в сейсмических данных определяются корректирующие значения для решения задач из п.1 (временные подвижки, амплитудные множители или корректирующие фильтры).

Разработанный алгоритм с четкой последовательностью действий, вариативностью, выгодно отличается от традиционных алгоритмов возможностью использования итерационного или матричного метода с введением псевдоаприорной информацией.

В **третьей главе** исследуются особенности алгоритма поверхностно-согласованной коррекции сейсмических сигналов в матричной и итерационной реализации, определяется область их применения и приводятся примеры верификации на наземных и морских сейсмических данных [Кушнарв, Горевячев и др., 2021; Кушнарв, Горевячев и др., 2022].

В **разделе 3.1** описывается задача определения длиннопериодных компонент в поверхностно-согласованной постановке, которая остается нерешенной при использовании итеративных методов, таких как метод Гаусса-Зейделя. Исследование показывает, что неточность решения в данном случае определяется несвязностью системы сейсмических наблюдений, особенно в случаях, когда длина профиля значительно превышает длину расстановки. В **разделе 3.2** для разных типов факторных моделей на примере профильных данных показано, что при увеличении периода вариаций факторов (превышающего полторы длины расстановки) скорость сходимости и точность итерационного решения снижается из-за неоднозначного перераспределения значений констант и линейных составляющих в решении, вследствие недостаточной связности системы наблюдений. Однако увеличение базы наблюдения (например, с 16 до 200 приёмников) значительно повышает точность и скорость сходимости итерационного процесса, что подтверждается снижением среднеквадратичного отклонения оценок от модельных данных. В **разделе 3.3** на примере трехфакторной модели (источник-приёмник-ОГТ)

показано, что в отличие от итерационного метода, который не обеспечивает точного разделения факторов в случае наличия в данных длиннопериодных вариаций, использование матричного метода с дополнением матрицы псевдоаприорной информацией значительно повышает точность решения за счет обеспечения связности наблюдений [Mitrofanov, ..., Goreyavchev, 2022].

В **разделе 3.4** выполнен сравнительный анализ методов решения задачи разделения факторов для площадных систем сейсмических наблюдений, где неточное определение длиннопериодных компонент проявляется в меньшей степени благодаря большей связности данных. На примере синтетической системы с 14706 источниками и 20301 точкой приёма сравниваются матричный метод (разложение Холецкого с дополнением матрицы) и итеративные методы (LSQR и BICGSTAB). При использовании матричного метода существенно повышается точность решения, но требуется больше времени для вычислений, в то время как итеративные методы быстрее, но их точность зависит от заданного допустимого отклонения. Результаты факторного разложения на площадных данных показывают, что оба метода дают близкие оценки факторов, включая длиннопериодные вариации.

С использованием матричного метода в **разделе 3.5** решается задача поверхностно-согласованной деконволюции на модельных данных. Результаты деконволюции, полученные с использованием итеративных методов (LSQR, BICGSTAB) и матричного метода (разложение Холецкого), показывают, что матричный метод обеспечивает более высокую точность и стабильность при меньшем времени вычислений, особенно при увеличении объема данных.

В **разделе 3.6** выполняется поверхностно-согласованная коррекция амплитудных спектров данных морской инженерной сейсморазведки, полученных в акватории Белого моря с использованием заглубленной установки и электроискрового источника «Спаркер». При этом основное внимание уделяется анализу формы сигнала прямой волны и коррекции её вариаций. В результате факторного разложения форма сигнала прямой волны стабилизируется и заметно снижается вариативность амплитудных спектров, что подтверждается формой гистограмм амплитудных спектров, близкой к нормальному распределению. Усложнение факторной модели добавлением фактора общей центральной точки также подтверждает вывод, что основные вариации формы сигнала прямой волны вызваны факторными составляющими, а не шумом [Горевачев и др., 2016; Mitrofanov, Goreyavchev et al., 2021].

В **разделе 3.7** выполняется поверхностно-согласованная деконволюция на площадных наземных данных (разложение источник-

приёмник). Результаты показывают, что деконволюция разработанным алгоритмом даёт схожие результаты с промышленным ПО Geovation (на основе итеративного метода Гаусса-Зейделя). Небольшие различия в интенсивности сигнала связаны с разными подходами к заданию уровня белого шума. Анализ, полученных в ходе деконволюции, амплитудных спектров показывает, что алгоритм корректно восстанавливает спектры сигнал без существенных искажений (Рисунок 2). Разработанный Алгоритм обеспечивает сопоставимое с коммерческим ПО (Geovation) качество результатов поверхностно-согласованной деконволюции при меньших вычислительных затратах.

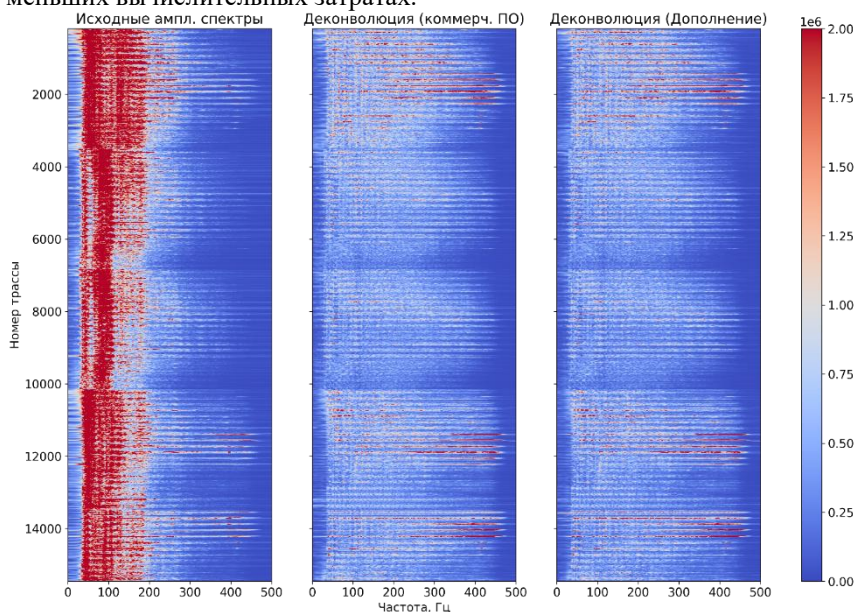


Рисунок 2 – Амплитудные спектры по всему набору данных до и после поверхностно-согласованной деконволюции (левый рисунок – исходные спектры, средний – спектры после дековолюции в пакете Geovation, правый – спектры после дековолюции алгоритмом дополнений).

В разделе 3.8 описана апробация разработанного алгоритма в ходе решения задачи поверхностно-согласованной коррекции амплитуд на примере площадных наземных данных. Разработанный алгоритм, основанный на итерационном решении систем линейных уравнений, эффективно учитывает факторы источника и приёмника при обработке наземных данных (71 млн наблюдений, 100 тыс. факторов). Сравнение с

промышленным пакетом Geovation показало, что результаты практически идентичны: различия в факторах не превышают 3–4%, а визуальный анализ разрезов, карт RMS-амплитуд (Рисунок 2) и гистограмм подтверждает полную сопоставимость. Алгоритм также успешно апробирован в рамках 5-факторной модели (источник, приёмник, ОГТ, удаление, азимут) [Горевачев и др., 2024].

Разработанный алгоритм поверхностно-согласованной компенсации на основе прямого решения систем линейных уравнений оптимален для определения длиннопериодных вариаций (>1.5 длины расстановки) в профильных данных. Итеративные методы требуют либо увеличения расстановки, либо большего числа шагов, причём их эффективность сильно зависит от связности наблюдений. Для площадных данных проблема длиннопериодных вариаций менее актуальна благодаря высокой геометрической связности, что делает итерационные методы предпочтительными для оценки остаточных поправок. Однако в случае поверхностно-согласованной деконволюции итеративные решатели (в том числе с предобуславливанием) уступают матричному методу по скорости достижения сопоставимой точности, особенно при росте объёма данных и числа факторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатом работы является алгоритм поверхностно-согласованной коррекции обработки кинематических (остаточных статических времён) и динамических характеристик (амплитуд, формы сигнала) по данным профильной и площадной сейсморазведки. Алгоритм теоретически и экспериментально обоснован и реализован в виде научно-исследовательской версии программного обеспечения, разработанного на языке Python. Использование при разработке алгоритма прямого матричного обращения с дополнением псевдоаприорной информацией обеспечивает единственность и устойчивость решения; позволяет определять длиннопериодные вариации (период которых превышает 1.5 длины расстановки) для профильных и площадных данных. Повышение точности решения при использовании итерационных методов для профильных данных требует либо увеличения длины расстановки, либо значительного увеличения числа итераций, особенно при слабой связности наблюдений. Повышение точности решения за счет использования матричного метода особенно значимо в современной тенденции перехода к высокоплотным сейсмическим наблюдениям для профильных расстановок.

Для площадных систем наблюдения, где геометрическая связность данных выше, итерационные методы остаются эффективными для оценки остаточных временных поправок или вариаций амплитуд. Однако в задачах поверхностно-согласованной деконволюции (при оценке вариаций амплитудных спектров) итеративные решатели требуют значительно больше времени для достижения точности, сопоставимой с матричной реализацией алгоритма, особенно при увеличении объема данных и числа оцениваемых факторов. Важным аспектом является подготовка единого решателя, обеспечивающего определение корректирующих поправок для всей совокупности рассматриваемых частот. Использование матричной реализации алгоритма имеет явное преимущество в скорости и точности решения, что делает его предпочтительным для обработки больших объемов данных на этапе поверхностно-согласованной деконволюции.

Применение разложения в виде полиномов к факторам позволяет оценить количество и тип неоднозначно определяемых компонент при решении задачи поверхностно-согласованной коррекции сейсмических сигналов, чтобы получить точное решение даже при недостатке априорной информации. При этом количество неоднозначно определяемых компонент явным образом задает минимальный объем требуемой априорной информации.

Преимуществом является также его способность эффективно работать с большими объемами сейсмических данных, что особенно важно в современных условиях, когда объемы сейсмической информации постоянно растут. Введение априорной информации в алгоритме повышает точность расчетов и расширяет область его применения. В частности, он может быть использован для решения задач, связанных с обработкой данных в реальном времени, в полевых условиях, что открывает новые возможности для автоматизации процессов сейсмической разведки.

Дальнейшее развитие исследования может быть направлено на разработку и совершенствование подходов к работе с более сложными, интервальными факторными моделями, которые учитывают характеристики частотно-зависимого затухания сигнала в среде. Такие модели позволят более точно оценивать вариации сигналов в пределах целевых объектов в волновом поле путем послойной оценки вариаций в характеристиках сигналов на вышележащих горизонтах. Кроме того, факторные представления могут быть использованы для контроля и интерпретационного сопровождения обработки сейсмических данных, например, для анализа невязок в сейсмической томографии или выделения азимутальной компоненты в динамических характеристиках

сигналов, что весьма значимо при подготовке данных к проведению AVAZ-инверсии, где точность определения азимутальных изменений напрямую влияет на качество интерпретации и прогноза трещиноватости.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК, включая свидетельства о государственной регистрации программ ЭВМ

1. Mitrofanov G.M. Improving accuracy in studying the interactions of seismic waves with bottom sediments / G.M. Mitrofanov, N.A. Goreyavchev, R.S. Kushnarev // Journal of Marine Science and Engineering. – 2021. – V. 9. – №. 2. – P. 229.

2. Mitrofanov G.M. On the Long-Period Statics Problem in Seismic Investigations / G.M. Mitrofanov, V.I. Priimenko, N.A. Goreyavchev // Pure and Applied Geophysics – 2022. – V. 179 – P. 1661-1677.

3. Свидетельство о регистрации программы ЭВМ FADE2D / Г.М. Митрофанов, Н.А. Гореевчев, Р.С. Кушнарев // Св-во о регистр. прогр. 2021664234; RU; №2021663286, заявл. 25.08.2021, опубли. 02.09.2021.

4. Свидетельство о регистрации программы ЭВМ FADE3D / Р.С. Кушнарев, Н.А. Гореевчев, Г.М. Митрофанов // Св-во о регистр. прогр. 2023680901; RU; № 2023669404, заявл. 22.09.2023, опубли. 06.10.2023.

5. Гореевчев Н.А. Свидетельство о регистрации программы ЭВМ Surface-consistent spiking deconvolution based on Cholesky decomposition (SC_Chol_SpikeDecon) / Н.А. Гореевчев, Г.С. Чернышов // Св-во о регистр. прогр. 2024682722; RU; № 2024681877, заявл. 24.09.2024, опубли. 26.09.2024.

6. Свидетельство о регистрации программы ЭВМ Application for express processing of seismic CMP data (Fast_CMP_proc) / Н.А. Гореевчев, А.В. Яблоков // Св-во о регистр. прогр. 2024683779; RU; № 2024681917, заявл. 24.09.2024, опубли. 14.10.2024.

Другие значимые публикации и лично доложенные материалы конференций

7. Изменение формы исходного импульса при морских сейсмических исследованиях / Н.А. Гореевчев [и др.] // Технологии сейсморазведки. – 2016. – № 4. – С. 67-76.

8. Гореевчев Н.А. Оценка изменения динамических характеристик сигналов при морских сейсмических исследованиях / Н.А. Гореевчев,

9. Г.М. Митрофанов // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2018. – Т. 3. – С. 50-58.

10. Горевячев Н.А. Особенности решения систем линейных уравнений при коррекции сейсмических сигналов / Горевячев Н.А., Митрофанов Г.М. // Геоинформатика. – 2018. – № 2. – С. 37-44.

11. Goreyavchev N. Seismic-Signal Distortion Analysis in Marine Profiling Data / N. Goreyavchev, G. Mitrofanov, M. Tokarev // NSG2020 3rd Conference on Geophysics for Mineral Exploration and Mining. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2020. – V.2020. – №1. – P. 1-5.

12. Кушнарв Р.С. Тестирование матричной реализации алгоритма поверхностно-согласованной компенсации сейсмических амплитуд / Р.С. Кушнарв, Н.А. Горевячев, Г.М. Митрофанов // Геофизические технологии – 2021. – № 4 – С. 26-35.

13. Кушнарв Р.С. Разработка и тестирование процедуры поверхностно-согласованной коррекции амплитуд / Р.С. Кушнарв, Н.А. Горевячев, Г.М. Митрофанов // Геофизические технологии – 2022. – № 4 – С. 89-104.

14. Горевячев Н.А. Введение псевдоаприорной информации в алгоритм поверхностно-согласованной деконволюции для площадных систем наблюдений / Н.А. Горевячев, Г.С. Чернышов, Г.М. Митрофанов // 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, 13-17 мая 2024 г.). – 2024. – Т. 2. – № 2. – С. 75-82.

Технический редактор Т.С. Курганова

Подписано в печать

Формат 60х84/16. Бумага офсет №1. Гарнитура Таймс

Печ.л. 0,9. Тираж 100. Зак. № 00

ИНГГ СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3