

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

На правах рукописи

ГОРЕЯВЧЕВ НИКИТА АЛЕКСЕЕВИЧ

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

1.6.9 – Геофизика

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
Митрофанов Георгий Михайлович,
доктор физико-математических наук, доцент

НОВОСИБИРСК

2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Глава 1 Аналитический обзор известных современных разработок, их достоинства и недостатки.....	13
1.1 Известные факторные представления сейсмических сигналов.....	14
1.2. Итерационный и матричный методы при оценке факторов.....	18
1.3 Алгоритмы на основе факторных представлений	20
Глава 2 Алгоритм поверхностно-согласованной коррекции и сейсмических сигналов с использованием факторных моделей и учетом псевдоаприорной информации	27
2.1 Системы линейных уравнений при решении задачи поверхностно- согласованной коррекции сейсмических сигналов.....	27
2.2 Введение псевдоаприорной информации для обеспечения единственности решения системы линейных уравнений	31
2.3 Контроль введения псевдоаприорной информации с использованием SVD-разложения и локализацией малых сингулярных чисел	34
2.4 Верификация алгоритма поверхностно-согласованной коррекции сейсмических сигналов на профильных и площадных системах сейсмических наблюдений	37
2.5 Супербинирование – еще один способ исключения неединственно определяемых компонент	56
Глава 3 Исследование особенностей алгоритма поверхностно-согласованной коррекции сейсмических сигналов в матричной и итерационной реализации.....	61
3.1 Локализация длиннопериодных вариаций в сейсмических данных	61
3.2 Численные эксперименты по оценке длиннопериодных составляющих на модельных 2D (профильных) данных	63
3.3 Матричный метод при оценке длиннопериодных составляющих на модельных 2D (профильных) данных	68

3.4 Численные эксперименты и сравнительный анализ методов (итерационного и матричного) в определении длиннопериодных вариаций на модельных 3D (площадных) данных	71
3.5 Сопоставление результатов методов (итерационного и матричного) в решении задачи поверхностно-согласованной деконволюции	78
3.6 Определение вариаций сигнала прямой волны в условиях морской инженерной сейсморазведки	81
3.7 Апробация алгоритма на полевых данных – поверхностно- согласованная деконволюция на площадных данных	92
3.8 Апробация алгоритма на полевых данных – поверхностно- согласованная коррекция амплитуд на площадных данных.....	95
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	103
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	105
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	106
СПИСОК ИЛЛЮСТРАТИВНОГО МАТЕРИАЛА	118

ВВЕДЕНИЕ

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

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, Гореевчев, 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 объемов 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 сейсморазведки, 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 статики, 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

Основой для решения поставленной задачи являются:

- теория дисперсионного анализ 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 преобуславливателей) 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 объёмами 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 (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 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 поверхностной-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 с дополнением и разложения Холецкого (совместно с Г.С. Чернышовым).

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

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.

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».

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.

Объем 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 участие и поддержку в решении разных вопросов и постановку научной задачи

Автор выражает благодарность заведующему лабораторией динамических проблем сейсмологии 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. Арефьеву. 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.

Глава 1 Аналитический обзор известных современных разработок, их достоинства и недостатки

Алгоритмы поверхностно-согласованной коррекции характеристик сейсмических сигналов, в первую очередь, необходимы для компенсации эффектов, искажающих сейсмический сигнал и возникающих из-за неоднородностей верхней части разреза.

Статистические факторные модели [Fisher et al., 1966; Шеффе, 1980] являются теоретической основой таких алгоритмов, которые были адаптированы для применения в сейсмических исследованиях [Гурвич, Яновский, 1971; Митрофанов, 1975]. Представление характеристик сейсмического сигнала через факторные модели позволяет глубже понять природу вариаций в сейсмических данных, обусловленных особенностями распространения сейсмических волн в реальных условиях [Аки, Ричардс, 1983]. В частности, к таким особенностям относятся условия возбуждения, приема, отражения и распространения сейсмического сигнала в среде.

Фактором называется изменение волнового поля или его функционала, связанное с определенными структурными элементами системы наблюдений, например, источниками, приемниками, общими центральными точками, удалениями. Значения фактора характеризуют изменения соответствующих величин, относящиеся к определенной области среды. Такая характеристика является интегральной, объединяющей различные процессы, происходящие в соответствующей части среды. Например, значения фактора за источник характеризует особенности формирования сигнала в области источника и зависит от многих параметров и процессов, относящихся к этой области. Факторная декомпозиция – это процесс разложения сейсмических данных и их характеристик на факторы.

Цель поверхностно-согласованной коррекции заключается в вычислении и применении поправок, учитывающих поверхностные факторы, такие как характеристики источника и приёмника. При этом наиболее точная оценка этих

факторов возможна только при использовании более сложных факторных моделей, включающих в себя как поверхностные составляющие (источник, приемник), так и составляющие, связанные с геологической средой (общая центральная точка (ОЦТ), удаление).

Факторные представления подходят для решения ряда задач при обработке сейморазведочных данных: при коррекции остаточной статики, при коррекции амплитуд и поверхностно-согласованной деконволюции.

1.1 Известные факторные представления сейсмических сигналов

Одним из важных этапов обработки данных метода отраженных волн общей центральной точки (МОВ ОЦТ), согласно обзору [Глоговский, Хачатрян, 1986], является приведение реального годографа ОЦТ к аналитической форме. Синфазное суммирование сигнала годографа отраженной волны чаще всего осложнено искажениями, возникающими в условиях реального эксперимента. Причиной искажения являются сложное строение рельефа, а также зоны многолетнемерзлых пород, траппов и других неоднородностей в зоне малых скоростей и подстилающем слое [Сысоев, 2011]. Для их устранения в сейморазведке предусмотрены временные сдвиговые поправки (статические), которые определяются, как методом замещения слоя [Козырев и др., 2003], так и методом сейсмической томографии верхней части разреза по годографам первых вступлений [Stein et al., 2009; Чернышов и др., 2022].

Основные этапы работы с временными статическими поправками при обработке сейсмических данных включают:

- вычисление и применение априорных статических поправок,
- корреляцию опорных отражающих горизонтов,
- коррекцию остаточных статических поправок.

Разработка алгоритмов поверхностно-согласованной коррекции сейсмических сигналов началась с коррекции остаточных временных задержек (этап 3), обусловленных особенностями областей возбуждения (ПВ) и приема

(ПП) сейсмических волн [Taner et al., 1974; Wiggins et al., 1976; Козырев, Королев, 1979; Сысоев, Митрофанов, 1989]. Глоговским В.М., в соавторстве с Хачатряном А.Р., выполнен детальный анализ алгоритмов коррекции временных статических поправок, известных на то время [Глоговский, Хачатрян, 1986].

Танер М. предлагает модель оценки и коррекции временных статических поправок [Taner et al., 1974], в которой рассматриваются времена прихода отраженных волн от глубоких горизонтов и при относительно малом удалении приемников от источника. В индексной форме ее можно представить в виде суммы факторов:

$$\Delta t_{ij} = \Delta t_i + \Delta t_j + c_{i+j}^0 + c_{i+j}^2(i-j)^2 + \varepsilon_{ij}. \quad (1)$$

В данном случае времена Δt_{ij} зависят от координат точки i -го источника (p_i) и j -го приемника (p_j), т.е.

$$\Delta t_{ij} = \Delta t(p_i, p_j). \quad (2)$$

Точки p_i и p_j зависят от координат x, y, z , равенство (2) применимо ко всем известным системам сейсмических наблюдений: профильным, площадным и пространственным.

Характеристики Δt_i и Δt_j из уравнения (1) определяют изменения во времени пробега в источниках и приёмниках. Коэффициенты c_{i+j}^0 и c_{i+j}^2 связывают эти изменения с годографом ОЦТ (3) для истинной и наблюдаемой модели. Эти коэффициенты выражаются через следующие уравнения:

$$c_{i+j}^0 = t_{i+j}^0 - t_{i+j}^{0*} \text{ и } c_{i+j}^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{t_{i+j}^0 * (V_{i+j}^{\text{эф}})^2} - \frac{1}{t_{i+j}^{0*} * (V_{i+j}^{\text{эф}*})^2} \right), \quad (3)$$

где параметры t_{i+j}^0, t_{i+j}^{0*} соответствуют истинной модели среды. Таким образом, оценки факторов ОЦТ могут быть использованы для уточнения годографов волн, которые отражают параметры истинной модели среды. Уточненные годографы являются входными данными для решения обратной кинематической задачи.

Важно отметить, что исследование Танера связано именно с разработкой факторных моделей для профильных 2D систем наблюдений. При этом выводы, приведенные в дополнительной части его исследования (определение неединственно определяемых составляющих для 2D систем сейсмических наблюдений) необходимо развить для площадных 3D систем наблюдения.

Примерно в то же время (70-ые годы XX века), на базе метода факторного разложении компонент (импульсных или спектральных), алгоритмы поверхностно-согласованной коррекции стали использовать для компенсации вариаций в динамических характеристиках сейсмических сигналов [Гурвич, Чьонг Минь, 1971; Гольдин, Митрофанов, 1973]. Задача коррекции формы сигналов и амплитуд сводится к системе линейных уравнений [Митрофанов, 1975; Wiggins et al., 1976] с использованием сверточной модели сейсмической трассы. Гурвич И.И. представляет сигнал отраженной волны в виде свертки первичного сигнала и линейной системы [Гурвич, Боганик 1980]. Линейной системой описываются свойства среды, а также области, прилегающие к зоне возбуждения и приёма.

$$W_{ij}(t) = S_i(t) * r_j(t) * M_k(t) * L_l(t), \quad (4)$$

где $W_{ij}(t)$ – наблюдаемая форма сигнала, $S_i(t)$ – форма сигнала в источнике и прилегающей зоне возбуждения, $r_j(t)$ – изменения формы сигнала на приемнике, $M_k(t)$ – изменения формы сигнала, связанные с характеристиками целевой среды, $L_l(t)$ – изменения сигнала, связанные с удалением ПВ-ПП, i – положение источника, j – положение приемника, $k = i+j$ – положение общей центральной точки, $l = i-j$ – расстояние между источником и приемником.

В работах Гольдина С.В. и Митрофанова Г.М. [Гольдин, Митрофанов, 1975; Митрофанов, 1975] нашло отражение развитие модели Гурвича за счет введения постоянной составляющей сигнала $F(t)$, а также влияния среды прохождения и наличие помехи $\xi_{ij}(t)$. При этом с использованием $s_i(t)$ описываются изменения формы сигнала в источнике.

$$W_{ij}(t) = F(t) * s_i(t) * r_j(t) * M_k(t) * L_l(t) + \xi_{ij}(t). \quad (5)$$

Поскольку сверточная модель сейсмической трассы нелинейна, то в задаче поверхностно-согласованной деконволюции для линеаризации необходим переход в спектральную область с последующим логарифмированием спектра (свертка нескольких факторов переходит в произведение и сумму после логарифмирования). Линеаризованный подход к задаче декомпозиции существенно упрощает оценку вариационных составляющих [Митрофанов, 1978; Goldin, Mitrofanov, 1990; Cambois, Stoffa, 1992; van Vossen et al., 2006; van Vossen, Trampert, 2007].

$$z_{ij}(\omega) = \alpha_i(\omega) + \beta_j(\omega) + \gamma_k(\omega) + \lambda_l(\omega) + \zeta_{ij}(\omega), \quad (6)$$

где $z_{ij}(\omega)$ – логарифмы амплитудного спектра сейсмических данных на фиксированной частоте ω , $\alpha_i(\omega)$ – логарифм вариаций амплитудного спектра на источнике, на фиксированной частоте ω , $\beta_j(\omega)$ – логарифм вариаций амплитудного спектра на приемнике, на фиксированной частоте ω , $\gamma_k(\omega)$ – логарифм вариаций амплитудного спектра, связанных с характеристиками целевой среды, на фиксированной частоте ω , $\lambda_l(\omega)$ – логарифм вариаций амплитудного спектра, связанных с удалением ПВ-ПП на фиксированной частоте ω , $\zeta_{ij}(\omega)$ – шумовая составляющая на фиксированной частоте ω .

Именно модель (6) описывает постановку задачи поверхностно-согласованной деконволюции [Levin, 1989; Cambois, Stoffa, 1992], а использование аппроксимационного подхода при описании влияния среды позволяет прийти к модели аналогичной модели (1) в лог-спектральной области [Митрофанов, 1980]. Особенностью постановки является предположение о минимальной фазе входных сигналов. При этом рассмотрение фазового спектра проводится отдельно, в поверхностно-согласованной постановке [Сысоев, Евдокимов, 1986; Cambois, Stoffa, 1993]. Совместное использование амплитудных и фазовых спектров в задаче факторной декомпозиции опробовано в работе [Kovaljev et al., 1992]. Исследование особенностей фазового спектра проведено в работах [Гольдин, 1976; Митрофанов, 1986; Бельфер, 1986; Mitrofanov, Priimenko, 2012]

При выполнении коррекции сейсмических амплитуд рассматривается модель произведения амплитуд сейсмического сигнала. Амплитуда сейсмического сигнала A_{ij} представляется в виде произведения постоянной амплитуды сигнала F , Ar_s – изменения амплитуды сигнала на источнике, Ar_j – изменения амплитуды сигнала на приемнике, Am_k – изменения амплитуды сигнала, связанными с характеристиками целевой среды, Al_l – изменения амплитуды, связанные с удалением ПВ-ПП, ξ_{ij} – помеха в данных.

$$A_{ij} + \xi_{ij} = F \times As_i \times Ar_j \times Am_k \times Al_l. \quad (7)$$

Линеаризация модели происходит путем логарифмирования выражения (7)

$$\ln A_{ij} + \varsigma_{ij} = \ln F + \ln As_i + \ln Ar_j + \ln Am_k + \ln Al_l, \quad (8)$$

где помеха ς_{ij} (если величина $\frac{\xi_{ij}}{A_{ij}}$ мала) определяется как

$$\varsigma_{ij} = \ln \left(1 + \frac{\xi_{ij}}{A_{ij}} \right) \approx \frac{\xi_{ij}}{A_{ij}}. \quad (9)$$

1.2. Итерационный и матричный методы при оценке факторов

Процесс разложения сейсмических данных на факторы на основе моделей (1, 6, 8) выполняется через решение системы линейных уравнений, которая представляется в матричной форме и может быть решена как через прямое обращение матрицы, так и итеративно [Марчук, 1977].

$$z = X\theta + \varepsilon, \quad (10)$$

здесь используются три вектора: z , θ , ε . z – состоит из наблюдений, θ – представляет собой неизвестные значения факторов, определяющие корректирующие поправки, а ε – включает в себя помеху (ошибка правой части). Матрица X обеспечивает связь наблюдений со значениями факторов. Ее вид определяется структурой наблюдений и используемой факторной моделью.

В работе [Марчук, Кузнецов, 1972] показано, что итерационные процессы являются сходящимися к решению, полученным методом наименьших

квадратов (частный случай метода верхней релаксации с параметром 1 или метод Гаусса-Зейделя, который используется в большинстве современных производственных решений), для систем линейных уравнений по типу (10). Преимуществом итерационного метода является его низкая чувствительность к отбраковке шумных наблюдений, а также в отсутствии необходимости построения и хранения полной матрицы системы линейных уравнений (10), что делает его эффективным при обработке больших объемов данных. Построение решения на основе итеративного метода нашло отражение в работах [Taner, 1974; Митрофанов, 1978; Шварцман, 1978; Шварцман, 1979; Cary, Lorentz, 1993; Давлетханов, 2014; Давлетханов, Силаенков, 2016; Kazemi et al., 2016; Митрофанов, Горевячев, 2017; Gülünay, 2017; Горевячев, Митрофанов, 2018]. Большинство современных производственных пакетов для реализации алгоритма поверхностно-согласованной коррекции кинематических и динамических характеристик используют итеративный метод.

Матричный метод предполагает решение системы линейных уравнений (10) напрямую. В работе [Wiggins et al., 1976] проведен детальный анализ свойств матрицы X на примере факторной модели коррекции статики Танера (1). С использованием SVD-разложения вычислены значения сингулярных числа, и установлено, что с увеличением периода вариаций качество решения задачи коррекции статики для данных 2D сейсморазведки снижается. Система линейных уравнений является переопределенной, что приводит к неединственности решения, и обладает плохой обусловленностью. При усложнении факторных моделей и переходе к площадным 3D системам наблюдения число обусловленности матрицы X возрастает, что свидетельствует о неустойчивости решения системы уравнений и ухудшении ее свойств. В 70-х годах вычислительные ресурсы не позволяли решать задачу коррекции сейсмических сигналов напрямую. Эти ограничения повлияли на дальнейшее развитие алгоритмов поверхностно-согласованной коррекции – упор был сделан в сторону итеративных методов. Но тем не менее, в работах [Cambois, Stoffa, 1992; van Vossen, Trampert, 2007] использовался матричный метод для решения

задачи поверхностно-согласованной деконволюции с фиксацией констант и линейных составляющих. Важно, что решения получены только для данных профильной 2D сейсморазведки. Ряд современных работ опирается на получение решения с помощью матричного метода, но с использованием регуляризации [Colombo et al., 2016; 2021], что безусловно улучшает свойства системы линейных уравнений и уменьшает число обусловленности, но не дает представления о неединственности определяемых составляющих.

Фиксация неоднозначно определяемых компонент в подобной задаче формируется путем дополнения матрицы псевдоаприорной информацией (т.е. дополнение СЛАУ новыми уравнениями). Существенным при определении псевдоаприорной информации является возможность ее формирования, исходя из вида и объема, на основе формальных условий [Митрофанов, Рачковская, 1996]. Данные условия гарантируют единственность и устойчивость получаемого решения. Впоследствии это решение может быть уточнено с использованием априорной информации, полученной экспериментальным путем. Такой подход позволяет обеспечить универсальность и технологичность процесса ввода априорной информации. Кроме того, он позволяет определять факторную модель, наилучшим образом подходящую для рассматриваемых данных.

1.3 Алгоритмы на основе факторных представлений

В современной сейсморазведке алгоритмы поверхностно-согласованной компенсации задействованы в широком спектре решаемых задач, например, таких как: коррекция остаточных статических времен, коррекция амплитуд, коррекция амплитудных и фазовых спектров (отдельно), деконволюция.

В работе [Aleardi et al., 2016] рассматривается задача поверхностно-согласованной оценки остаточной статики в нелинейной постановке и поиске глобального минимума с помощью «генетического» алгоритма. Авторы делают вывод о том, что генетический алгоритм позволяет найти глобальный минимум

достаточно устойчиво. При этом тестирование подхода производилось только в рамках инженерных задач 2D морской сейсморазведки. В работе была использована двухфакторная модель (источник-приёмник) для оценки 300 неизвестных величин, а временные вычислительные затраты составили около 3 часов. Даже для инженерных задач, обработка такого малого числа неизвестных за столь долгое время является неприемлемой. Кроме того, сопоставление со стандартными подходами было продемонстрировано лишь в качественной постановке (сопоставление двух разрезов). Доработка данного подхода для инженерных задач в дальнейшем может представлять интерес. Но для решения задач разведочной геофизики этот подход на данный момент выглядит бесперспективным.

В работах [Cary, Nagarajappa, 2013; Nagarajappa, Cary, 2015] описывается проблема оценки сигнальной составляющей в присутствии случайных шумов, и как следствие, некорректная оценка поверхностно-согласованных скаляров, включающих влияние случайного шума. Особенно подобный эффект проявляется в областях, где происходит поглощение сигнала (болото, сухие участки), а уровень случайного шума не изменяется. В работе [Nagarajappa, Cary, 2015] предложен подход к более точной оценке сигнальной составляющей на основе расчета взаимной корреляции трасс из данных с суммарной нормированной трассой в пределах одной общей средней точки (ОСТ).

В качестве подтверждения правильности описанных подходов в работах [Cary, Nagarajappa, 2013; Nagarajappa, Cary, 2015] можно выделить работу [Baranov et al., 2021]. В работе авторы приводят синтетические примеры описания проблемы, рассмотренной в работе [Cary, Nagarajappa 2013]. Примеры позволяют в полной мере понять проблему сложности оценки сигнала в присутствии шума и неоднородных поверхностных условий. Авторы делают вывод о необходимости оценки «несмещенного» сигнала с использованием функции взаимной корреляции и затем проводят поверхностно-согласованную коррекцию амплитуд. В результате, реальные разрезы месторождения Западной Сибири были скорректированы качественнее, в сравнение со стандартным

подходом, включающим «смещенную» оценку сигнала за счет шума. Данный подход заслуживает внимания и должен рассматриваться в качестве одной из опций в современных реализациях процедур поверхностно-согласованной компенсации амплитуд. Возможные проблемы могут проявляться в случае низкой кратности данных или низкого соотношения сигнал/шум.

В работе [Baek et al., 2019] авторы рассматривают линеаризованную модель (8) разложения амплитуд. Авторы, говорят о неединственности решения задачи, а также справедливо замечают, что увеличение объема данных в современной сейсморазведке никак не помогает в решение данной проблемы, а иногда и усложняет ее. В модель (8) авторы вводят дополнительные параметры, пытаясь переопределить фактор источника через группы источников, относящихся к определенным поверхностным условиям. Для каждой группы, возможно использование своего веса. Таким образом, авторы предлагают переопределять и факторы приемника. Веса позволяют авторам бороться с проблемой неединственности, но стоит отметить, что подбор весов необходимо производить вручную для каждого случая использования процедуры. Кроме того, правильность подбора можно определить только по синтетической модели. Подбор весов никак не увязывается с реальной задачей и не привязан к геологии. Этот подход по смыслу схож с фиксацией неединственно определяемых составляющих, но в нем не хватает геолого-геофизического обоснования.

В работе [Kirchheimer, Ferber, 2001] рассматривается усовершенствованный устойчивый подход к поверхностно-согласованной деконволюции. Подход позволяет устойчиво проводить деконволюцию на трассах с присутствием нерегулярного шума. При этом стандартная процедура поверхностно-согласованной деконволюции дает плохой результат. Потрассная деконволюция дает приемлемый результат, но при этом искажает амплитуды, что в современной обработке сейсмических данных считается недопустимым. В этих условиях авторы предлагают устойчивый алгоритм поверхностно-согласованной деконволюции за счет введения дополнительных операторов, которые определяются по трассам с нерегулярным шумом с энергией,

подтянутой к энергии модельной трассы, определенной в условиях отсутствия нерегулярного шума. В работе [Zhuravko et al., 2015] приводится реализация подхода из работы [Kirchheimer, Ferber, 2001] и примеры ее успешного применения на реальных данных. Надо отметить, что в работе [Zhuravko et al., 2015] нет усовершенствования подхода и новизны, но сам по себе подход, предложенный в работе [Kirchheimer, Ferber, 2001] заслуживает внимания.

В работе [Kazemi et al., 2016] предложен новый подход к построению операторов для проведения поверхностно-согласованной деконволюции. Основным достоинством работы является проведение деконволюции без условия о том, что входной сигнал должен быть минимально-фазовым. На основе z -преобразования входных трасс строится система линейных уравнений, через решение которой производится оценка операторов для источников и приемников (сразу для всей формы сигнала, а не только амплитудных спектров).

Важные вопросы рассматриваются в работе [Сысоев, 2012]. Прежде всего, это вопросы исследования неединственности решения системы линейных уравнений при использовании модели поверхностно-согласованной деконволюции, основанной на свёрточном представлении (5). Исходя из предположения о том, что импульсная характеристика среды является постоянной величиной, а функция удаления является симметричной в пределах сейсмограммы ОЦТ, для поверхностно-согласованной деконволюции рекомендуется использовать модель, включающую факторы источника, приёмника, удаления и средней сигнальной составляющей. Опираясь на это допущение, часть неединственно определяемых компонент (линейная и параболическая для фактора ОЦТ) не существует, что упрощает оценку вариаций формы сигнала. Вторым важным акцентом в работе является анализ сочетания процедуры поверхностно-согласованной деконволюции и процедуры поверхностно-согласованной коррекции амплитуд. Проведение поверхностно-согласованной коррекции амплитуд после поверхностно-согласованной деконволюции может приводить к ошибкам, в случае, если результирующая форма сигнала нестационарна.

В работе [Zhang et al., 2015] рассматривается несколько подходов к деконволюции, причем большое внимание уделяется тому, какой импульс на выходе процедуры должен получаться. Акцент делается на том, что результат обработки, попадающий к интерпретатору, должен иметь нуль-фазовый вид. Безусловно это важный момент, но только в контексте кинематической интерпретации. Кроме того, в работе приведен хороший обзор методов деконволюции. Из недостатков можно отметить, что в работе делается упор на контроль качества проводимых процедур деконволюции, но существенно новых подходов и метрик не предложено.

Цикл работ [Colombo et al., 2016; 2018; 2021] посвящен поверхностно-согласованной обработке данных преломленных и рефрагированных волн. Авторы отмечают повышение количества и плотности сейсморазведочных данных и, кроме того, необходимость пересмотра алгоритмов обрабатывающих процедур, на примере поверхностно-согласованных процедур, с целью повышения эффективности их работы и извлечения максимальной пользы. Высокая плотность данных позволяет использовать специальные виды сортировок по типу – X-Y-offset-azimut, в свою очередь, данная сортировка позволяет производить более детальный контроль качества пикировки первых вступлений. После контроля качества пикировки, авторы приступают к оценке короткопериодной и длиннопериодной статики. Для получения длиннопериодной статики авторы получают псевдотрехмерный куб скоростей на основе данных преломленных волн и затем переходят к короткопериодной статике на основе поверхностно-согласованного подхода к временам первых вступлений. Полученный куб скоростей можно также использовать в качестве референтной модели для томографии. Безусловно, данный подход заслуживает высокой оценки, поскольку задействует преломленные волны и доказывает свою состоятельность на множестве примеров с реальными данными.

В работе [AlJishi et al., 2019] приведен пример работы с реальными данными в осложненных поверхностных условиях (пустыня, перемежение песчаных дюн с соляными отложениями). Авторы делают упор на важность

подготовки данных к процедурам поверхностно-согласованной компенсации и последующему AVO – анализу. Основной процедурой подготовки является введение постоянных амплитудных коэффициентов, рассчитанных в пределах наборов (бинов) удалений. Из-за неравномерности удалений авторы дополнительно проводят регуляризацию с целью достижения более гладких изменений в рассчитанных амплитудных коэффициентах. Но здесь важно заметить, что домножение на амплитудные коэффициенты вне привязки к положениям источников и приемников не является поверхностно-согласованным, а значит последующая обработка (поверхностно-согласованная компенсация амплитуд, AVO – анализ) не может считаться обработкой в истинных амплитудах. Поэтому данный подход можно считать справедливым, но только в случае, если сохранение амплитуд не требуется.

Нельзя не отметить важность поверхностно-согласованных процедур, поскольку современная обработка сейсмических данных ориентирована на сохранение динамических характеристик. В связи с этим перспективными для оценки динамических искажений выглядят более сложные факторные модели, в отличие от моделей (1, 6), включающие в себя зависимость от угла падения луча, азимута, а также учитывающие затухание сигнала в среде [Митрофанов, 2018; Митрофанов, Гореевчев и др., 2023а].

Выводы

В заключении аналитического обзора можно сказать, что основная часть современных работ ориентирована на развитие поверхностно-согласованных алгоритмов, а также на развитие новых способов их применения. При этом большинство работ основано на итерационных методах, а вопросы единственности и устойчивости системы линейных уравнений практически не исследуются. Кроме того, вопрос внесения априорной информации в ходе получения решения также не рассматривается должным образом.

Для современной площадной сейсморазведки как в случае итерационных методов, так и прямого решения необходимо проанализировать свойства систем

линейных уравнений (10), оценить достоинства каждого из методов и определить, в каких случаях оптимально использовать итерационные методы (с предобуславливанием), а в каких использовать прямое решение. В настоящее время не существует четкого алгоритма действий для проведения графа поверхностно-согласованных процедур обработки сейсмических данных: какие из методов необходимо использовать для решения поверхностно-согласованных задач разного типа (оценка остаточных статических времен, оценка вариаций амплитуд, оценка операторов для проведения деконволюции).

Глава 2 Алгоритм поверхностно-согласованной коррекции и сейсмических сигналов с использованием факторных моделей и учетом псевдоаприорной информации

В главе описана разработка нового алгоритма поверхностно-согласованной коррекции сигналов, который позволяет вносить дополнения в систему линейных уравнений в виде псевдоаприорной или априорной информации, что обеспечивает единственность и устойчивость решения. Контроль введения дополнения осуществляется с использованием SVD-разложения. Верификация и тестирование алгоритма проводится на модельных данных для разных типов факторных моделей.

2.1 Системы линейных уравнений при решении задачи поверхностно-согласованной коррекции сейсмических сигналов

Исследование свойств матрицы X из уравнения (10) позволяет понять многие особенности получаемых решений. В частности, природу неединственности определяемых составляющих и количество требуемой априорной информации для единственного решения задачи в поверхностно-согласованной постановке.

При выполнении соответствующего исследования необходимо ответить на три принципиальных вопроса:

1. Как система наблюдений влияет на единственность решения задачи?
2. Можно ли решить проблему единственности решения путем перестроения структуры системы линейных уравнений (10)?
3. Каким образом необходимо вносить априорную информацию в систему уравнений (10), чтобы обеспечить единственность и устойчивость решения?

При исследовании первого вопроса было введено понятие допустимого плана наблюдений как структуры данных, не влияющих на единственность получаемого решения. В работах [Гольдин, Митрофанов, 1975; Митрофанов

1975] было показано, что для таких планов неединственность решения возникает за счет взаимодействия между факторами. На основе структуры матрицы X такое взаимодействие определяется линейными комбинациями столбцов этой матрицы. Понимание указанного факта привело к идее использования базисных функций, обеспечивающих представление наблюдений и факторов в форме, которая позволяет наиболее просто проанализировать вопросы единственности. Эта идея в эвристической форме впервые была высказана в работе Танера [Taner, 1974].

Реализация идеи заключается в определении системы линейно-независимых функций $\{f_r(p_i, p_j), r = 0, \dots, N - 1\}$ переменных p_i, p_j , которые задают координаты точек возбуждения и приема сейсмического сигнала. Эти точки также определяют положение наблюдений в узлах дискретной решетки. Получить коэффициенты разложения можно как для наблюдений (вектор z), так и для значений факторов (вектор θ) по выбранным функциям для допустимых планов наблюдений.

Если система функций $f_r(p_i, p_j)$ определена, то можно установить, какие составляющие факторов определяются однозначно по имеющимся наблюдениям. Например, при использовании полиномиальных функций определяется максимальная степень, начиная с которой все составляющие факторов определяются единственным образом. Также можно решить вопрос о необходимом объеме априорной информации, который количественно соответствует числу неоднозначно определяемых коэффициентов разложения факторов. Эти знания позволяют сформулировать условия, обеспечивающие единственность определения соответствующих составляющих факторов. Такие условия могут быть введены в систему (10), гарантируя единственность ее решения [Митрофанов, 2014].

Важным при формировании дополнительных условий, обеспечивающих единственность построенного решения, является то, что условия могут быть сформированы как по имеющейся априорной информации, так и на основе

знаний о характере факторов. Такие условия могут быть названы псевдоаприорной информацией, т.к. они формируются из формальных соображений обеспечения единственности и устойчивости решения задачи.

Возможность формирования априорной информации различными способами позволяет вводить ее несколькими вариантами.

(1). Итерационное решение системы (10), при котором последовательно оцениваются отдельные факторы или их группы с последующим введением априорной информации в полученное решение.

Преимущество: простота реализации и интуитивная понятность для специалистов по обработке сейсмических данных.

Недостаток: низкая скорость сходимости итерационного процесса.

(2). Решение расширенной системы (10) с включением в нее имеющейся априорной информации.

Преимущество: получение единственного решения, полностью соответствующего имеющейся априорной информации.

Недостатки: зависимость от качества априорной информации, а также низкая технологичность в случае появления новых априорных данных, что требует повторного решения расширенной системы.

(3). Использование псевдоаприорной информации для получения решения системы (10) с последующим дополнением априорными данными.

Преимущество: получение единственного и устойчивого решения для различных типов факторных моделей. Это позволяет выбирать оптимальную модель и определять необходимую априорную информацию.

Недостатки: необходимость повышения квалификации специалистов и разработки внутренних критериев для оценки качества используемых моделей. Кроме того, может потребоваться увеличение объема априорных данных для охвата всех используемых моделей [Митрофанов и др., 2023г].

Прежде чем перейти к введению псевдоаприорной информации в систему линейных уравнений, следует описать свойства матрицы X . Она имеет блочную структуру, где каждый из блоков соотносится с определенным фактором.

Элементы блоков (значение 1) увязывают между собой значения факторов θ и значения наблюдений z . Номерам наблюдений z в системе соответствуют номера строк в матрице X . Номерам факторов θ в системе соответствуют номера столбцов в матрице X . Вид матрицы X для определенных систем наблюдения приведен на рисунке 1.

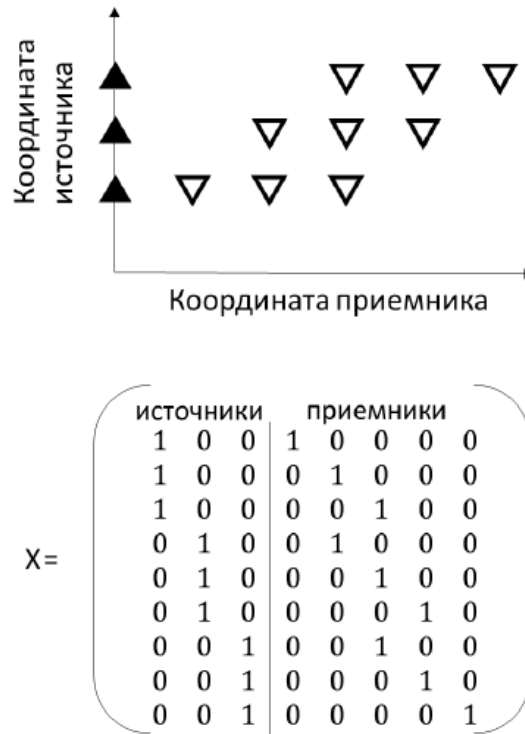


Рисунок 1 – Пример двумерной системы сейсмических наблюдений (верхний рисунок) и построенной для нее матрицы X (нижний рисунок).

Как правило, в сейсмических экспериментах системы линейных уравнений вида (10) являются переопределенными, вследствие чего матрица X является прямоугольной с числом строк, превышающим число столбцов, а система не имеет точного решения. Поэтому при построении ее решения используется метод наименьших квадратов [Беклемишев, 1983]. Для этого достаточно преобразовать систему (10) путем домножения на транспонированную матрицу X . В результате чего получается новая система линейных уравнений, решение которой будет соответствовать минимальному расстоянию по норме между векторами z и $X\theta$:

$$X^T z = X^T X \theta. \quad (11)$$

После выполненного преобразования вектор $\mathbf{X}^T \mathbf{z}$ переобозначается в $\mathbf{y}$ и в дальнейшем будет называться вектором правых частей, матрица $\mathbf{X}^T \mathbf{X}$ будет переобозначена в матрицу $\mathbf{A}$. И тогда определяемые значения факторов θ будут рассчитаны путем перемножения вектора правых частей и обратной матрицы $\mathbf{A}$.

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}^T \mathbf{z} = \mathbf{A} \theta. \quad (12)$$

2.2 Введение псевдоаприорной информации для обеспечения единственности решения системы линейных уравнений

Как уже упоминалось ранее, матрица $\mathbf{X}$ имеет плохие свойства, а именно плохо обусловлена. Плохие свойства матрицы определяются наличием краевых наблюдений, не обладающих достаточной кратностью для вычисления нескольких факторов, кроме того, это связано с наличием неоднозначно определяемых компонентх в системе уравнений. Усечения краевых наблюдений позволяет исключить первую причину; в дальнейшем их значения могут быть восстановлены с помощью интерполяции решений ближайших наблюдений. Для устранения второй причины предлагается использовать метод алгебраических дополнений.

В случае двумерных систем наблюдений матрица $\mathbf{X}$ дополняется по следующему алгоритму [Митрофанов, 1988]. Например, в рамках трехфакторной модели для 2D системы сейсмических наблюдений (α – фактор источника, β – фактор приёмника, γ – фактор общей глубинной точки (ОГТ), i – координата источника, j – координата приёма, z_{ij} – наблюдения), вектор правых частей представляется в виде суммы факторов (13), а сами факторы раскладываются в полиномиальный ряд до первой степени (14-16).

$$z_{ij} = \alpha_i + \beta_j + \gamma_{\frac{i+j}{2}} + \varepsilon_{ij}, \quad (13)$$

$$\alpha_i = a^0 + a^1 i, \quad (14)$$

$$\beta_j = b^0 + b^1 j, \quad (15)$$

$$\gamma_{\frac{i+j}{2}} = c^0 + \frac{c^1 i}{2} + \frac{c^1 j}{2}. \quad (16)$$

Разложения (14, 15, 16) подставляются в выражение (13) и получается новое уравнение (17):

$$z_{ij} = (a^0 + b^0 + c^0) + a^1 i + b^1 j + \frac{c^1 i}{2} + \frac{c^1 j}{2}. \quad (17)$$

В представленном уравнении число неизвестных больше, чем число известных величин. Для того чтобы уравнивать число известных и неизвестных, можно зафиксировать одну постоянную C и одну из линейных составляющих L .

$$z_{ij} = C + Li + (b^1 + \frac{c^1}{2})j. \quad (18)$$

При работе с квадратной матрицей A ее можно дополнить следующим образом (19):

$$\begin{cases} A\theta = y \\ H\theta = c \end{cases} \quad (19)$$

где матрица H и вектор c определяются типом априорных данных. Если реальная априорная информация отсутствует, второе матричное уравнение может быть построено на основе псевдоаприорной информации (фиксация константы, линейной составляющей и т.д.) [Рао, 1968]. Здесь и далее подход с использованием дополнений матрицы псевдоаприорной или априорной информацией будет называться – *алгоритмом дополнений* в случае прямого решения системы линейных уравнений (10).

В случае площадных систем наблюдений реализация алгоритма дополнений представлена в работах [Гореявчев, Митрофанов, 2018; Mitrofanov, Goreyavchev, 2019; Гореявчев и др., 2024].

В линейной постановке факторное представление задаётся выражением (13). Данные z_{ij} площадной 3D сейсморазведки, зависящие от координат пункта возбуждения (ПВ) (x_i, y_i) и пункта приёма (ПП) (x_j, y_j) представляются в виде полиномиального разложения с соответствующими коэффициентами.

Аналогично раскладываются факторы α_i , β_j , $\gamma_{\frac{i+j}{2}}$. В результате определяется система (20):

$$\begin{cases} z_{ij} = z^0 + z_{i_x}^1 + z_{i_y}^1 + z_{j_x}^1 + z_{j_y}^1 \\ \alpha_i = \alpha^0 + \alpha_{i_x}^1 + \alpha_{i_y}^1 \\ \beta_j = \beta^0 + \beta_{j_x}^1 + \beta_{j_y}^1 \\ \gamma_{\frac{i+j}{2}} = \beta^0 + \gamma_{i_x+j_x}^1/2 + \gamma_{i_y+j_y}^1/2 \end{cases} . \quad (20)$$

Каждому коэффициенту соответствует определенная степень (0 — для константы, 1 — для линейной составляющей) и индекс, который отражает связь с расположением точки возбуждения, точкой приема и координатами. Путем объединения коэффициентов с одинаковыми степенями и суммирования уравнений для координат точек возбуждения и приема формируется система уравнений (21).

$$\begin{cases} d^0 = \alpha^0 + \beta^0 + \gamma^0 \\ d_{i_x}^1 + d_{j_x}^1 = \left(\alpha_{i_x}^1 + \frac{\gamma_{i_x}^1}{2} \right) + \left(\beta_{j_x}^1 + \frac{\gamma_{j_x}^1}{2} \right) \\ d_{i_y}^1 + d_{j_y}^1 = \left(\alpha_{i_y}^1 + \frac{\gamma_{i_y}^1}{2} \right) + \left(\beta_{j_y}^1 + \frac{\gamma_{j_y}^1}{2} \right) \end{cases} . \quad (21)$$

В каждом уравнении системы слева стоят известные величины (данные), а справа — неизвестные величины (факторы). Чтобы решить первое уравнение, нужно найти две константы, таким образом число неизвестных совпадет с числом известных величин. В случае поверхностно-согласованной деконволюции в системе линейных уравнений необходимо зафиксировать две постоянные величины. В матричном представлении фиксация достигается добавлением к матрице X строки с константой на месте определенного фактора. Так как точные значения коэффициентов заранее неизвестны, фиксация компонент осуществляется путем дополнения матрицы произвольными значениями (внесение псевдоаприорной информации для повышения устойчивости решения), которые в дальнейшем могут быть заменены на априорную информацию для повышения точности решения.

Чтобы разрешить оставшиеся уравнения системы (21), нужно зафиксировать две линейные компоненты (одну вдоль оси X , другую вдоль оси Y). Для решения трехфакторной задачи поверхностно-согласованной коррекции с использованием дополнений необходимы четыре условия: две постоянные составляющие и две линейные составляющие (по направлениям X и Y) [Гореявчев и др., 2024].

Аналогичные построения могут быть выполнены для четырехфакторной модели, используемой в выражениях (6) и (8). В этом случае требуется использовать уже вторую степень разложения для наблюдений и факторов. В результате получается существенно большая система, содержащая 15 уравнений. Ее анализ позволяет определить количество дополнительных условий необходимых для построения единственного решения в четырехфакторной задаче.

2.3 Контроль введения псевдоаприорной информации с использованием SVD-разложения и локализацией малых сингулярных чисел

Одним из инструментов для контроля корректного введения дополнений в матрицу X и обрезки краевых наблюдений является SVD-разложение. SVD-разложение используется для исследования свойств получаемых систем линейных уравнений, в том числе и для сравнения вариантов матрицы X до дополнения и после.

Для определения свойств матрицы X через SVD-разложение рассмотрим два вида систем сейсмических наблюдений. Первый – система из 9 наблюдений без смещения вдоль координаты приёма (рисунок 2а слева) и система из 9 наблюдений, но со смещением вдоль координаты приёма (рисунок 2а справа).

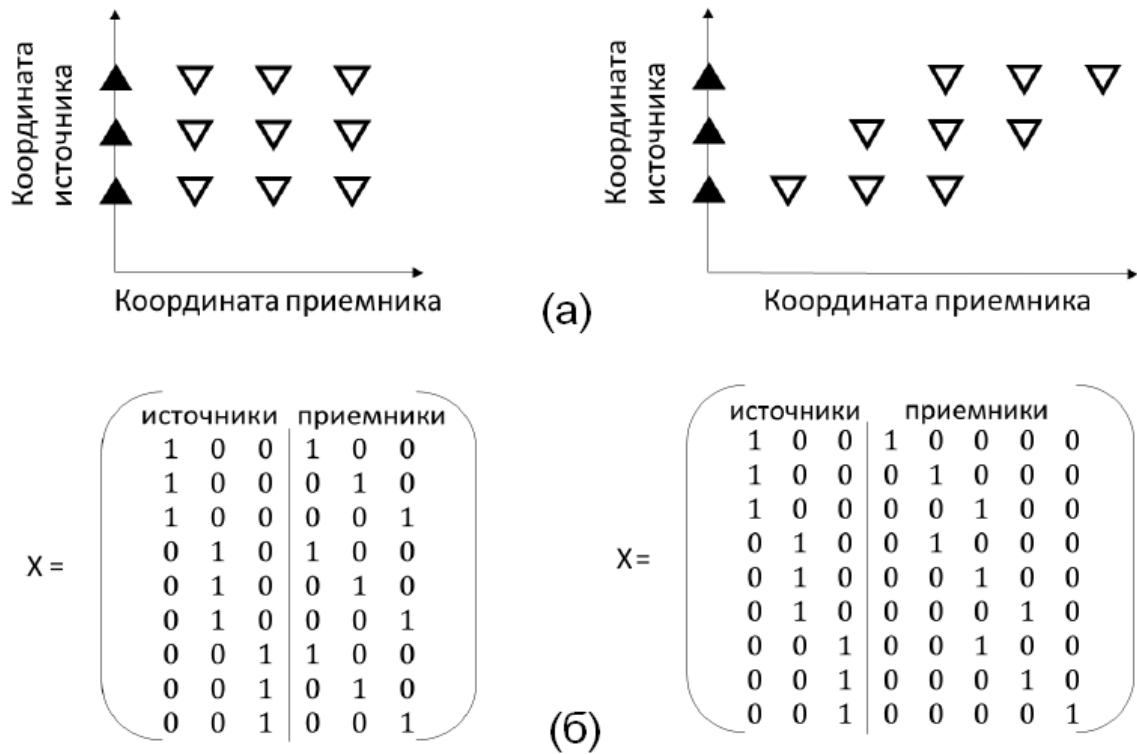


Рисунок 2 – Влияние типа системы наблюдений на вид матрицы X . (а) Два типа систем наблюдений и (б) соответствующие им матрицы, полученные для двухфакторной модели.

Система наблюдений с подвижными приемниками определяет задачу разделения факторов в рамках сейсмического эксперимента, в отличие от системы с неподвижными приёмниками, что соответствует классической задаче дисперсионного анализа [Шеффе, 1980]. Для двухфакторной модели:

$$z_{ij} = \alpha_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}, \quad (22)$$

приведена матрица X для плана наблюдений в рамках классической задачи дисперсионного анализа приведена в левой части рисунка 2б. Для сейсмического эксперимента с подвижной расстановкой – матрица X представлена в правой части рисунка 2б и имеет иную структуру. Обе матрицы вырождены, с одной линейной зависимостью между столбцами, относящимися к группам факторов источников и приемников. Зависимость обусловлена невозможностью однозначного разделения постоянной составляющей между факторами источников и приёмников.

Для левой и правой матриц, представленных на рисунке 2б, рассчитаны значения сингулярных чисел: $\{2.45; 2.73; 2.73; 2.73; 2.73; 2.53e-16\}$ и $\{2.3; 2.97; 2.83; 2.55; 2.29; 0.96; 0.68; 2.32e-16\}$. Последние малые значения соответствуют линейной зависимости между факторами. Предпоследние значения сингулярных чисел (0.96 и 0.68 по сравнению с 2.73 и 2.73) говорят об их уменьшении при переходе к системам со смещением расстановки. Такое поведение сингулярных значений связано с недозаполненностью прямоугольной области, в рамках которой рассчитываются значения факторов. Этот эффект усиливается при увеличении масштаба систем сейсмических наблюдений, а именно вытягивания наблюдений вдоль всего профиля.

На рисунке 3 сверху изображены системы наблюдений с подвижными приемниками. Левая система включает 128 приемников, а правая — 16 приемников. Обе системы включали 160 источников. Значения сингулярных чисел, представленные на рисунке 3 снизу, показывают, что недозаполненность плана наблюдений ухудшает свойства матрицы X , а число обусловленности для системы наблюдения с короткой базой уменьшается на несколько порядков [Гореявчев, Митрофанов, 2018].

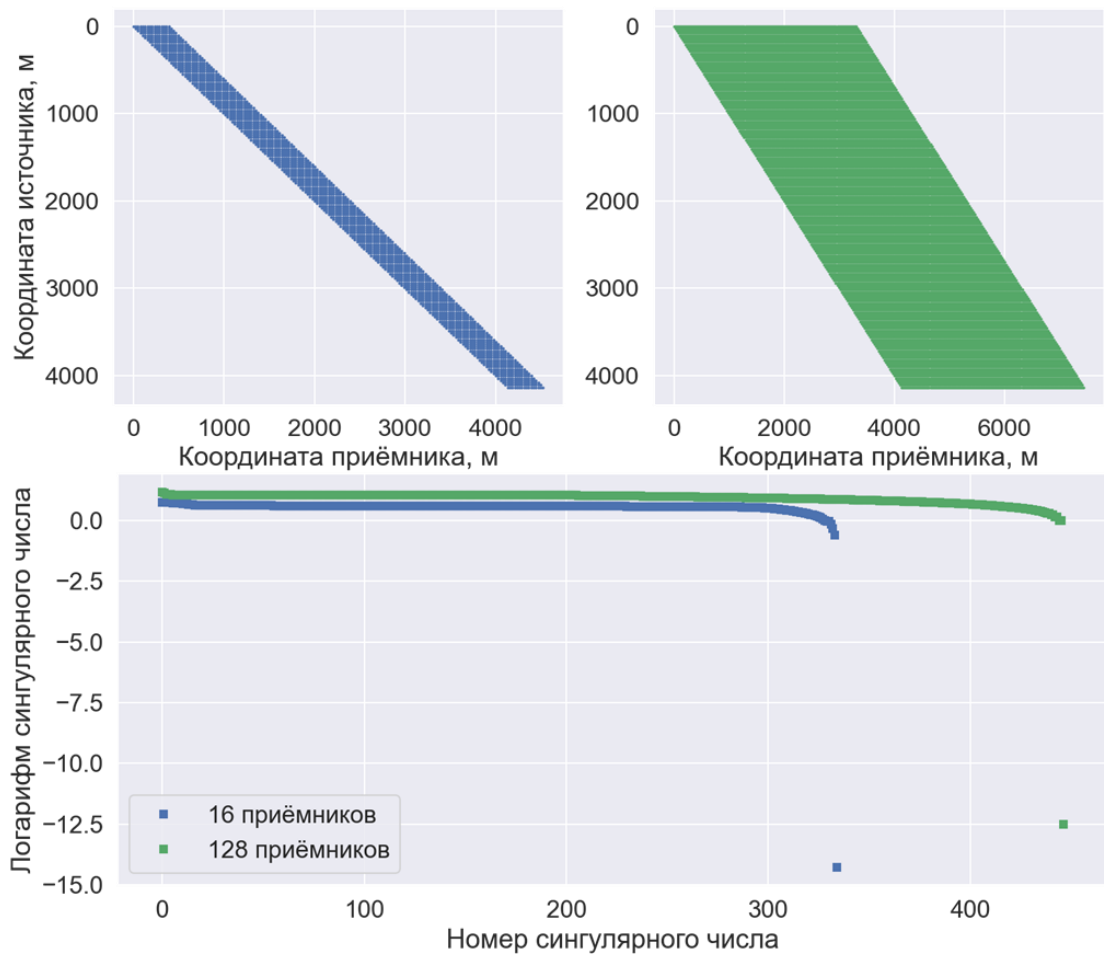


Рисунок 3 – Два типа систем наблюдения и значения сингулярных чисел матрицы X . Верхний рисунок – два типа систем наблюдения с разным числом приёмников и нижний рисунок – значения сингулярных чисел для них.

2.4 Верификация алгоритма поверхностно-согласованной коррекции сейсмических сигналов на профильных и площадных системах сейсмических наблюдений

После обеспечения единственности решения системы линейных уравнений на основе дополнения матрицы псевдоаприорной информацией важно верифицировать корректность работы алгоритма путем проведения численных экспериментов на модельных синтетических данных. В рамках верификации необходимо сопоставить решение, полученное с помощью разработанного алгоритма, с решением, вычисленным на основе итерационного

метода (метод LSQR или метод BICGSTAB). При этом сравниваются не только точность получаемого решения, но и скорость его получения.

Важно учесть особенности матриц, которые могут возникать в случае большого объема данных. Кроме того, необходимо проверить некоторые гипотезы по дополнению матриц X и A и их работу для разных систем наблюдений, как простых (небольшие 2D), так и крупных (стандартная 3D съемка).

1. Идентичны ли решения при одинаковом дополнении матриц X и A ?
2. Идентичны ли решения при дополнении матрицы X значением константы на все факторы (например, все факторы источника) и дополнении матрицы X значением константы на один фактор (например, на один источник)?
3. Какой из методов решения систем линейных уравнений подойдет для данной задачи наилучшим образом (точность, скорость работы, оптимальное выделение памяти)? И в каких случаях?

Здесь и далее все синтетические тесты будут рассмотрены в линейно-алгебраической постановке задачи поверхностно-согласованной коррекции статики, то есть модель факторов линейна изначально, дополнительного логарифмирования не требуется.

Традиционно подготовка входных наборов в обработке сейсмических данных для разных типов поверхностно-согласованных задач включает:

- Расчет взаимно-корреляционной функции в пределах временного интервала для набора трасс и определение по ней относительной подвижки между трассами. Данная временная подвижка является набором входных данных для коррекции остаточной статики.
- В пределах заданного временного окна рассчитываются значения среднеквадратичных амплитуд для каждой трассы, которые затем логарифмируются для линеаризации факторной модели.

Среднеквадратичные амплитуды являются набором входных данных для коррекции амплитуд.

- В рамках заданного временного окна вычисляются значения автокорреляционной функции для каждой трассы, на основе которых рассчитываются и логарифмируются амплитудные спектры. Логарифмы амплитудных спектров служат входными данными для процедуры деконволюции.

Для начала рассмотрим простой вариант системы сейсмических наблюдений. Для тестирования была создана синтетическая 2D система сейсмических наблюдений (Рисунок 4), включающая 11 ПВ и 21 ПП, максимальное число каналов в косе 13 и расстояние между приемниками в косе 25 м.

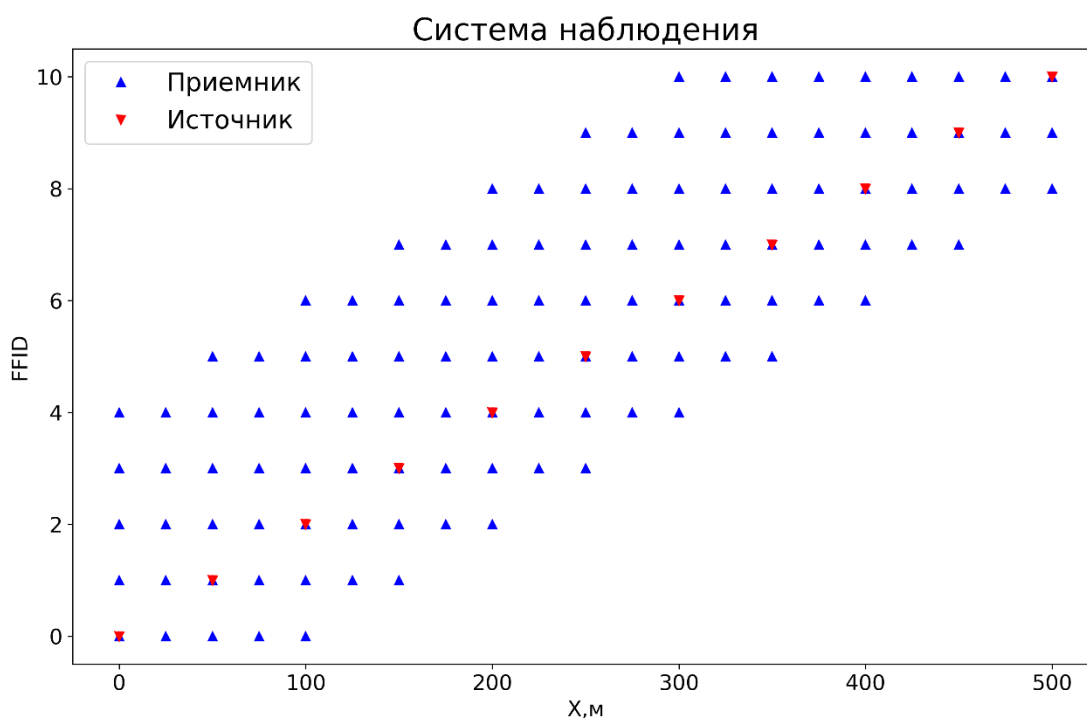


Рисунок 4 – Синтетическая 2D система сейсмических наблюдений, красные треугольники – положение источников, синие треугольники – положение приёмников.

В качестве входных данных для процедуры декомпозиции был использован набор синусоид разных частот, заданных индивидуально для

каждого из факторов. В результате сложения факторов, по аналогии с моделью (5) в 2-х факторном случае, были получены наблюдения – входные данные (Рисунок 5).

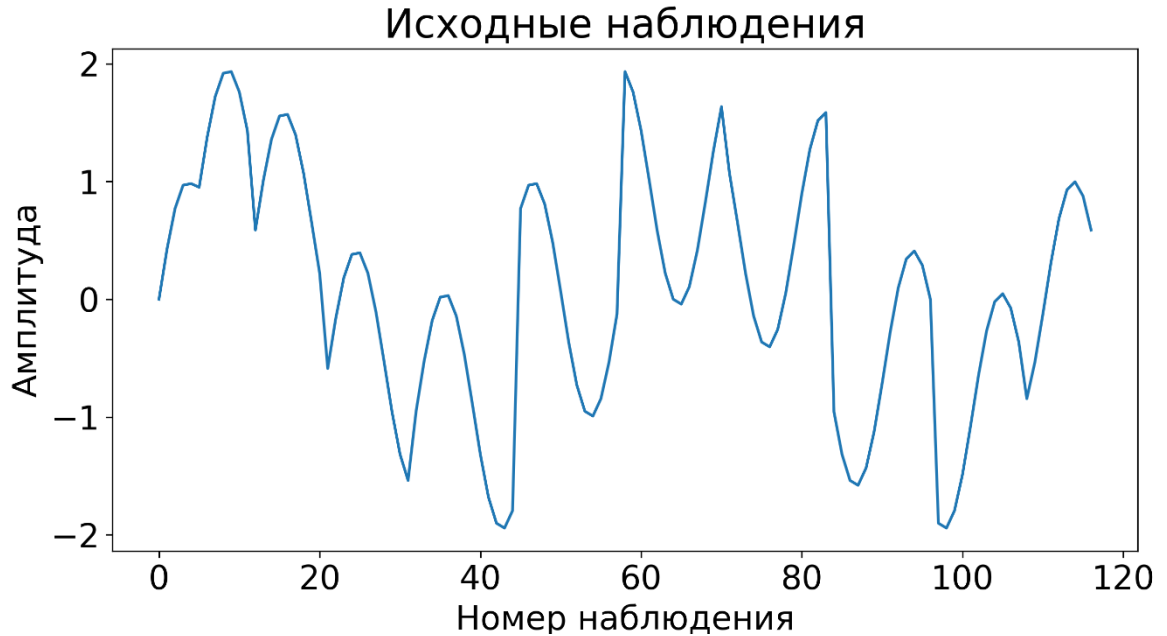


Рисунок 5 – Синтетические наблюдения, полученные в рамках 2-х факторной модели. В случае реального эксперимента каждому из наблюдений может соответствовать значение амплитуды трассы, времени или спектра.

Первым интересующим моментом является проверка насколько идентичными будут решения, полученные при помощи дополнения матрицы X и дополнения матрицы A . Элементы матрицы X состоят из нулей и единиц, а матрица A , состоит из неотрицательных чисел. Исходная матрица X для синтетической системы наблюдений представлена на рисунке 6.

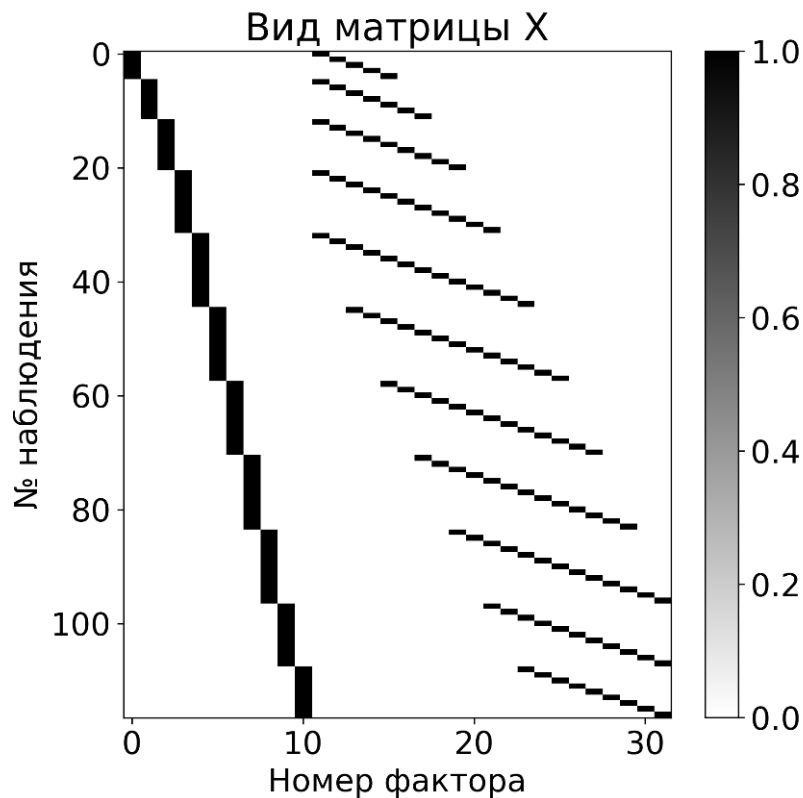


Рисунок 6 – Исходная матрица X для синтетической системы наблюдений, прослеживается блочная структура – первые 10 столбцов соответствуют факторам источника, последующие факторам приёмника. Белый цвет соответствует нулевым значениям.

Опираясь на выводы по выражениям (14-20), в рамках 2-х факторной модели, для матрицы X была зафиксирована константа в пределах столбцов, связанных с фактором источника. Значение константы было равномерно распределено на все 10 факторов источника и добавлено в виде нового наблюдения в нижней части матрица (Рисунок 7).

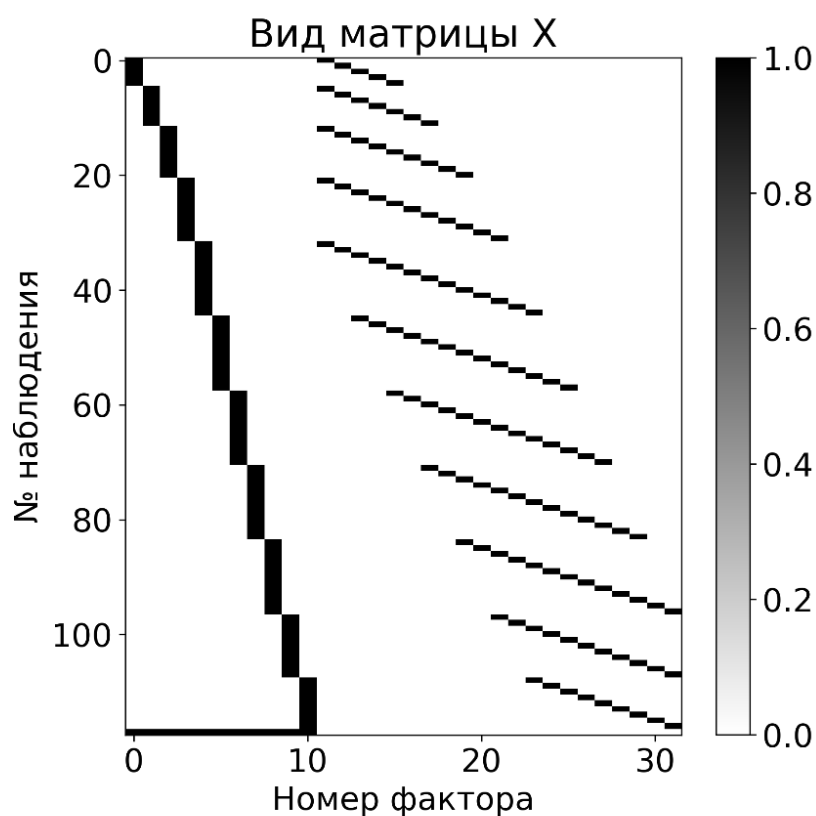


Рисунок 7 – Матрица X с дополнением для синтетической системы наблюдений, строка с константой на источниках добавлена в нижней части матрицы. Белый цвет соответствует нулевым значениям.

Матрица A, соответствующая матрице X с рисунка 7, представлена на рисунке 8.

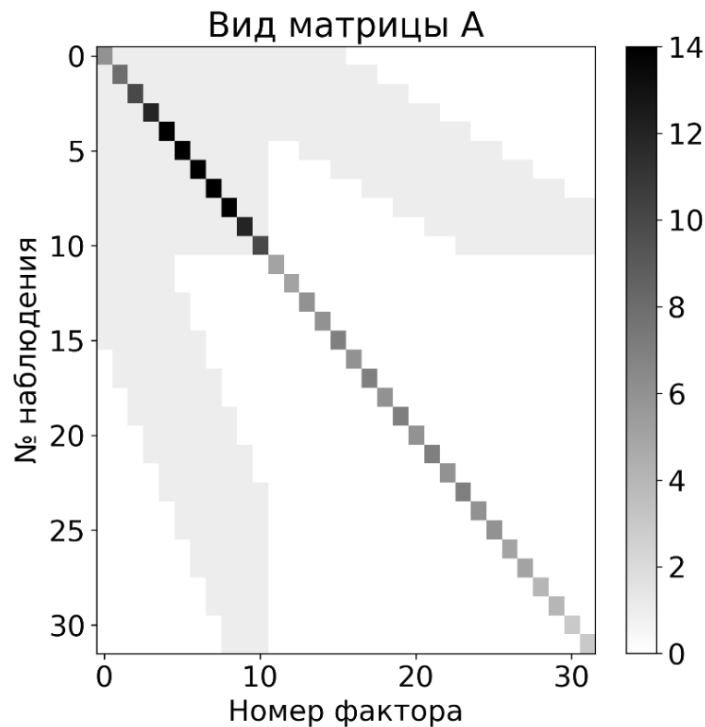


Рисунок 8 – Матрица A , полученная по матрице X с рисунка 7. Белый цвет соответствует нулевым значениям. Важным моментом является количество ненулевых наблюдений (а именно 100 элементов в пределах первых 11 строк и первых 11 столбцов).

Альтернативным вариантом получения решения является дополнение матрицы A (согласно условию 11), а не матрицы X . На рисунке 9 представлена матрица A дополненная строкой и столбцом с зафиксированной константой. Преимуществом такого подхода является то, что количество ненулевых элементов в матрице заметно меньше, чем в матрице с рисунка 8. Этот момент станет особо важным при переходе к современным системам площадных сейсмических наблюдений и выделении памяти под хранение матриц больших размеров, в том числе в разреженном формате (можно эффективно использовать в случае, когда количество ненулевых небольшое в сравнение с количеством нулевых элементов).

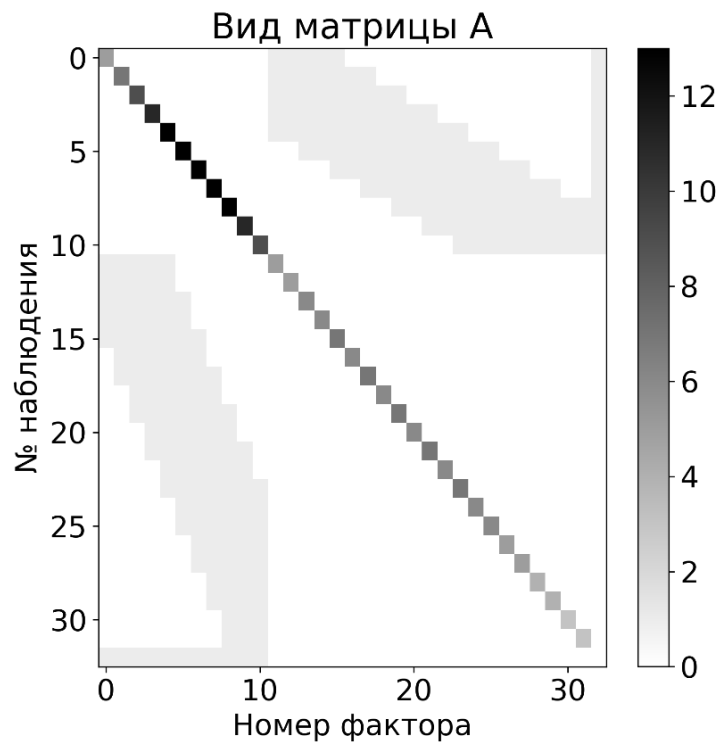


Рисунок 9 – Матрица A , дополненная строкой и столбцом с зафиксированной константой в пределах фактора источника.

В результате, полученные решения с помощью матрицы X и матрицы A являются идентичными, отличия сохраняются на уровне машинной точности вычисления (Рисунок 10).

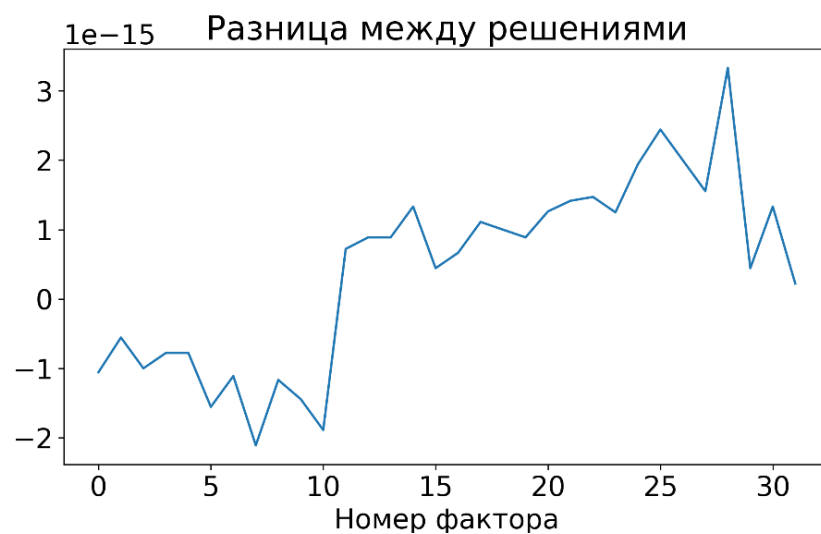


Рисунок 10 – Сопоставление решений, полученных с помощью дополнения матрицы X и матрицы A .

Из полученных решений, согласно модели (5), можно составить вектор наблюдений и сравнить его с исходным вектором, подаваемым на вход алгоритма (Рисунок 11).

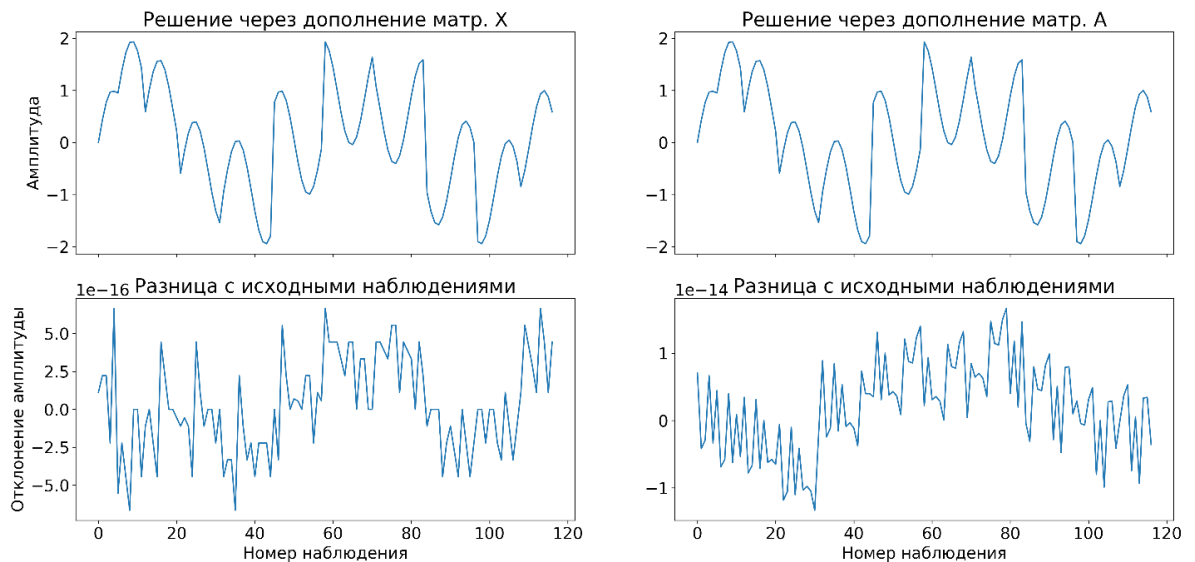


Рисунок 11 – Сопоставление векторов наблюдений, полученных через дополнение матрицы X (верхний левый рисунок), через дополнение матрицы A (верхний правый рисунок). Разница между векторами наблюдений, полученными в ходе факторной декомпозиции, представлена на левом и правом нижнем рисунках соответственно. Горизонтальная ось одинакова для всех рисунков. Относительная ошибка по норме L_2 в случае дополнения матрицы X составила $3.392e-15$, в случае дополнения матрицы A - $7.7013e-14$.

Следующим шагом стало рассмотрение варианта дополнения матрицы при помощи одного значения, а не множества значений вдоль фактора. Для сравнения результатов было создано два варианта матрицы X с разными дополнениями: дополнение константой вдоль всех положений источника (Рисунок 12 слева) и дополнение одним постоянным значением на 6 источнике (Рисунок 12 справа).

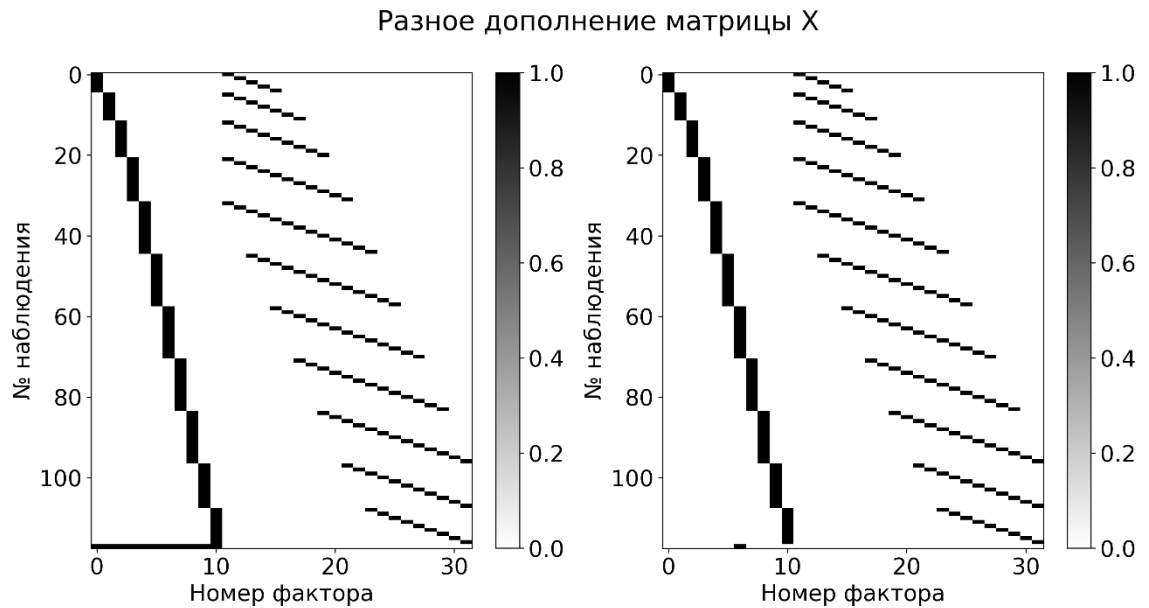


Рисунок 12 – Разные варианты дополнений матрицы X. Слева – дополнение константой вдоль всех источников (нижняя строка матрицы), справа – дополнение одним значением на 6 источнике (нижняя строка матрицы).

Полученные матрицы **A** отличались значениями на главной диагонали и заполнением блока числами в верхней левой части матрицы **A**. Матрица **A** на рисунке 13 справа, а именно верхняя левая часть, менее «плотная» (то есть, содержит больше нулевых значений), чем матрица **A** на рисунке 13 слева. Как и с примером выше, на рисунке 9, это будет иметь большое значение при обращении и хранении матрицы в условиях больших систем сейсмических наблюдений и большего объема входной информации.

Результирующие матрицы A

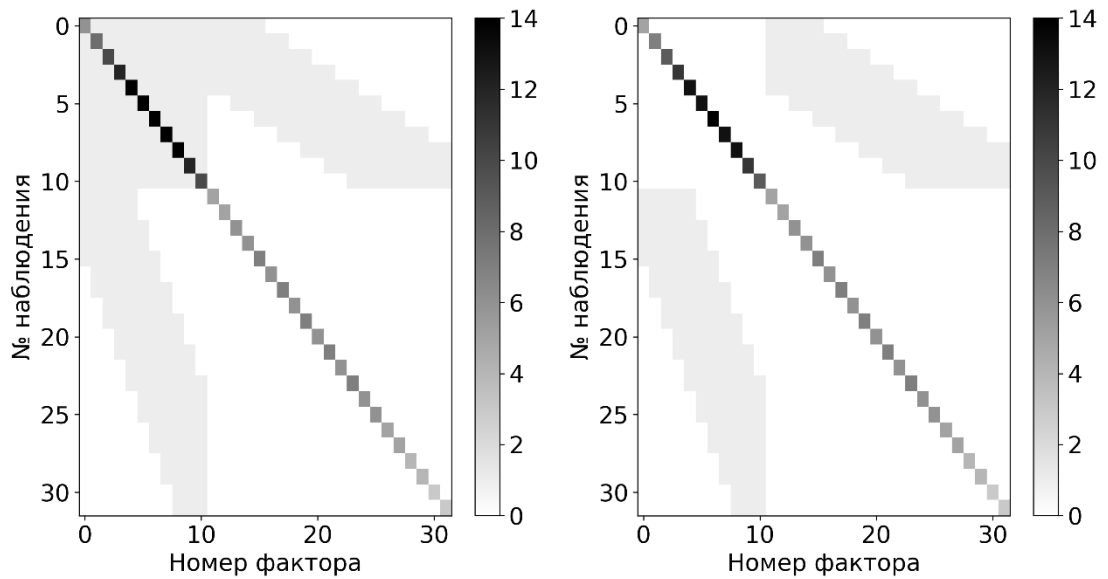


Рисунок 13 – Матрицы A , полученные по матрицам X с рисунка 12. Белый цвет соответствует нулевым значениям.

Отличие решений, полученных по матрицам A с рисунка 11, выражается в виде постоянного значения на каждом из факторов (Рисунок 14), причем на факторах источника это значение перераспределяется в положительную часть, а на факторе приемников в отрицательную. По модулю значение константы одинаково.

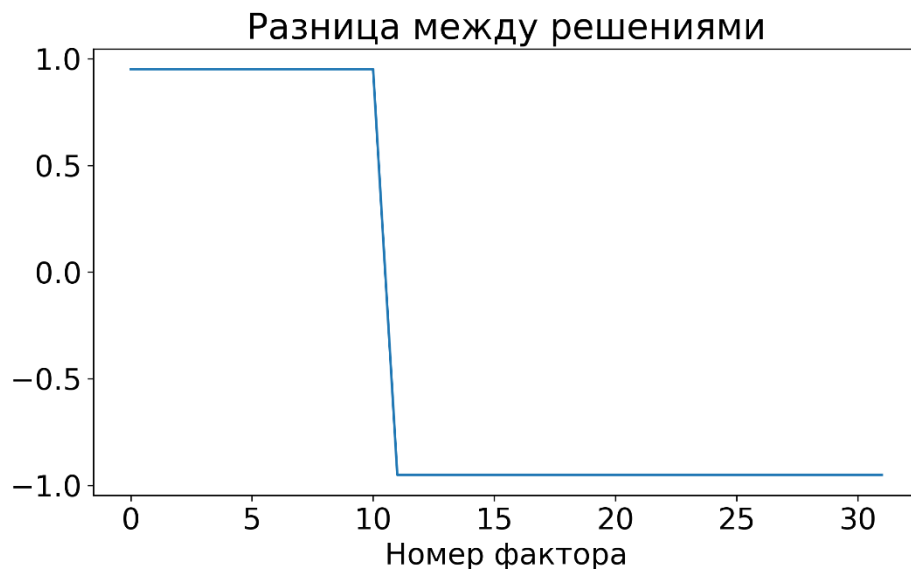


Рисунок 14 – Различие между решениями, полученным по дополнениям одной и несколькими константами. Первые 11 значений – фактор источника, остальные – фактор приемника.

Из полученных решений, согласно модели (5), можно составить вектор наблюдений и сравнить его с исходным вектором, подаваемым на вход алгоритма (Рисунок 15).

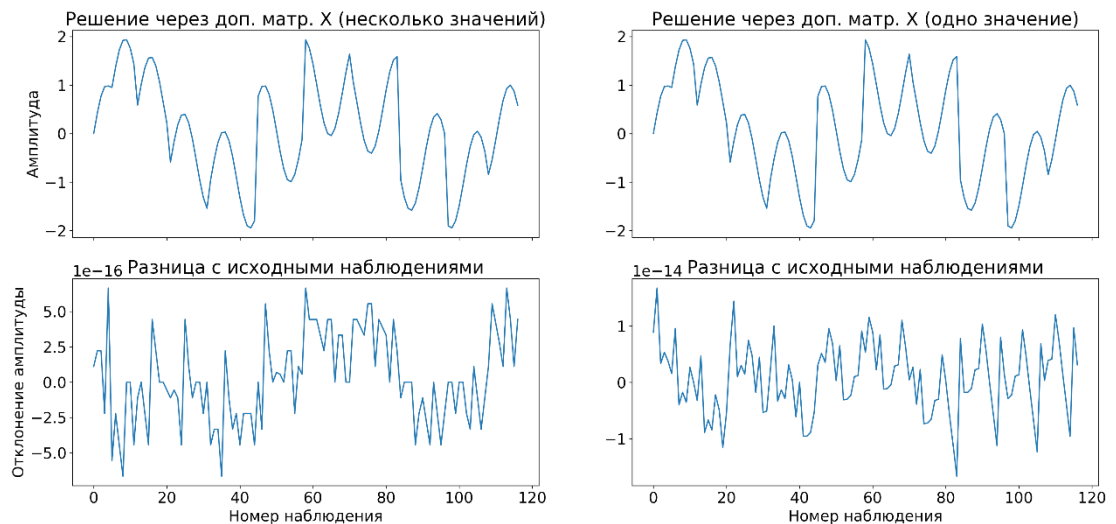


Рисунок 15 – Сопоставление векторов наблюдений, полученных через дополнение матрицы X несколькими значениями (верхний левый рисунок), через дополнение матрицы X одним значением (верхний правый рисунок). Разница между векторами наблюдений, полученными в ходе факторной декомпозиции, представлена на левом и правом нижних рисунках соответственно. Горизонтальная ось одинакова для всех рисунков. Относительная ошибка по норме $L2$ в случае дополнения матрицы X составила $3.392e-15$, в случае дополнения матрицы A - $6.768e-14$.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что решения отличаются на константу в пределах одного типа факторов. Но остается вопрос об устойчивости получаемых решений, поскольку при внесении в данные шумовой компоненты устойчивость решения должна понизиться в случае дополнения одним значением. Связано это с тем, что один из факторов, вдоль которого будет фиксироваться псевдоаприорное условие, может быть сильно осложнен

шумовой компонентой и не будет связан с информацией от геологической среды. При этом вес этого фактора будет значительным, в случае фиксации псевдоаприорной информации именно на нем, а значит и общее решение задачи приобретет неустойчивость. Напротив, при размазывании условия вдоль всех факторов этот эффект будет минимизирован.

Интересной особенностью представляется то, что итоговое суммарное решение практически идентично (Рисунок 15), в отличие от сравнения самих факторов (Рисунок 14). Это связано с тем, что при использовании модели (5) и перехода от факторов к наблюдениям отличие на константу перераспределяется в пределах наблюдений. Аналогичным образом отличия более высокого порядка (линейная составляющая, параболическая составляющая) будут перераспределяться при переходе от факторов к наблюдениям. Но стоит отметить, что в более сложных моделях (например, 4-х факторная модель в задаче деконволюции источник-приемник-ОЦТ-удаление) учет факторов может происходить по схеме: оценка 4-х факторов и последующее введение в данные только 2-х факторов (например, источник – приемник). В таком случае неоднозначно определяемые компоненты не будут перераспределены в суммарном решении, что является ошибкой. Для получения точного решения и фиксации неоднозначно определяемых компонент необходимо внесение априорной информации (в задаче деконволюции - знание формы сигнала на определенных ПВ, ПП).

При работе с большими системами наблюдений, включающими сотни миллионов наблюдений, необходимо проводить дополнительное тестирование выбора метода для решения системы, но работа с небольшими системами наблюдений позволяет сделать рекомендации.

Дополнение матрицы условием в виде одного значения эквивалентно решению с дополнением матрицы условием в виде нескольких значений. Этот подход позволяет получить менее «плотную» матрицу A путем дополнения матрицы X одним значением. Но вопрос устойчивости получаемого решения в таком случае остается открытым. Необходимо проводить исследование для

конкретного набора реальных наблюдений, в том числе, ориентируясь на соотношение сигнал-шум.

В случае больших систем наблюдений важным представляется то, что все матрицы в случае больших систем наблюдений будут храниться в спарсовом формате, поскольку в стандартном формате выделение памяти на их хранение может достигать объёмов в несколько терабайт.

Для тестирования используется библиотека линейной алгебры с открытым исходным кодом на python – `scipy.linalg`.

Решение задачи в рамках факторного разложения выполняется на основе разложения матрицы A (разложение Холецкого, оптимально подходит в случае симметричных положительно определенных матриц, которой является матрица A в результате перехода $X^T X$ и дополнения матрицы, которое делает ее ранг полным). Кроме того, решение исходной системы X или решение в постановке метода наименьших квадратов может быть получено итеративным способом, например, используя метод LSQR или стабилизированный метод бисопряжённых градиентов BICGSTAB, соответственно.

Рассмотрим синтетическую площадную 3D систему сейсмических наблюдений (Рисунок 16) с 22366 пунктами взрыва и 31626 пунктами приёма, количество наблюдений для такой системы составляет 19257126. Размеры матриц: матрица X 19257126 строк на 53992 столбцов, матрица A 53992 строк на 53992 столбцов. При этом число ненулевых элементов матрицы X составляет всего 0.003% от общего числа элементов, а для матрицы A 18%.

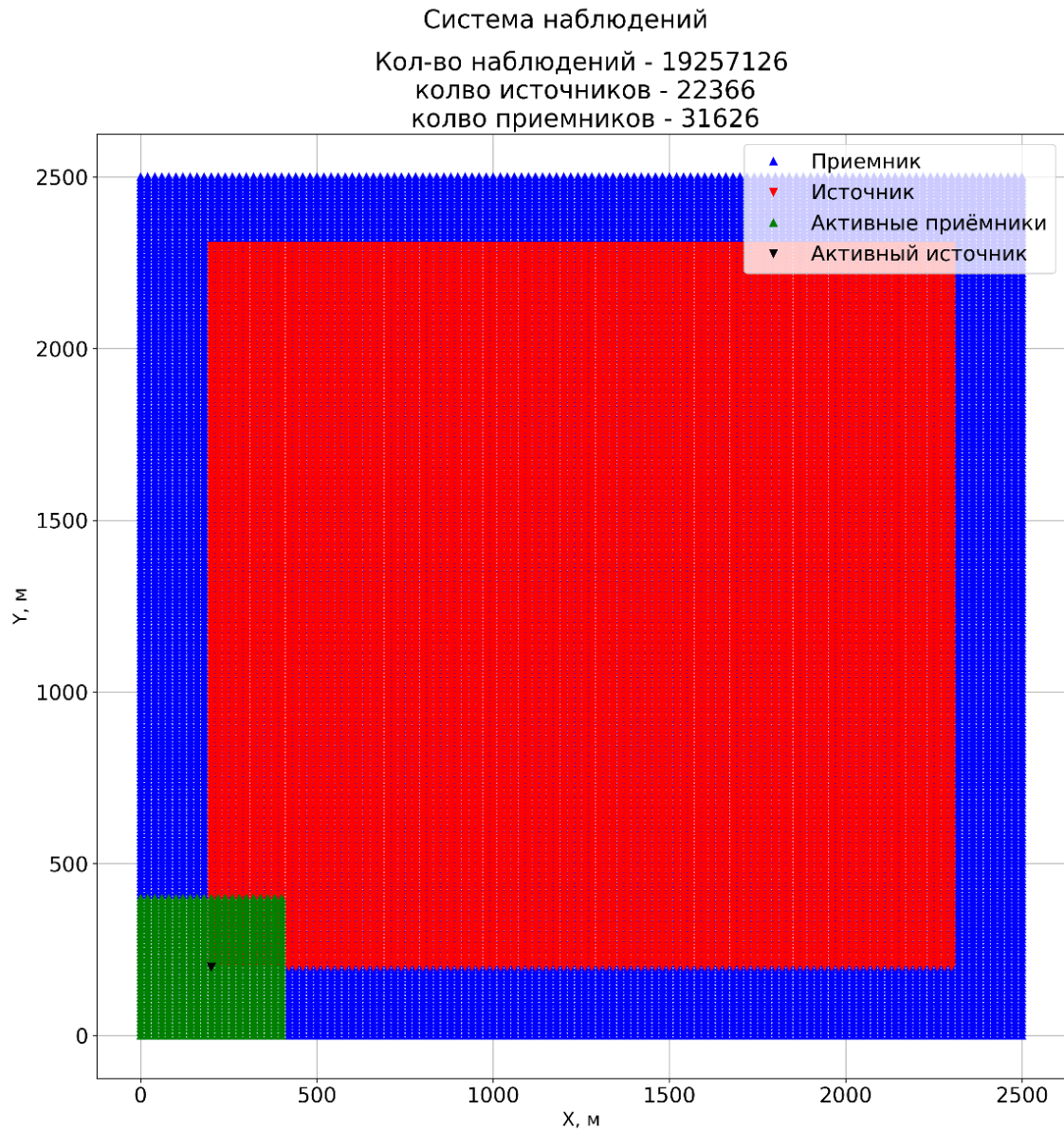


Рисунок 16 – Синтетическая система сейсмических наблюдений. Красными треугольниками обозначено положения источников, синими – положение приёмников. Зеленые треугольники обозначают положение приёмников в активной расстановке, черный треугольник обозначает источник в активной расстановке.

В качестве входных данных для тестирования в рамках 2-х факторной модели был создан набор наблюдений, полученный из синтетических факторов. Дополнительно наблюдения были осложнены значениями нормально распределенного шума с дисперсией 4. Значения моделируемых факторов на площади представлены на рисунке 17.

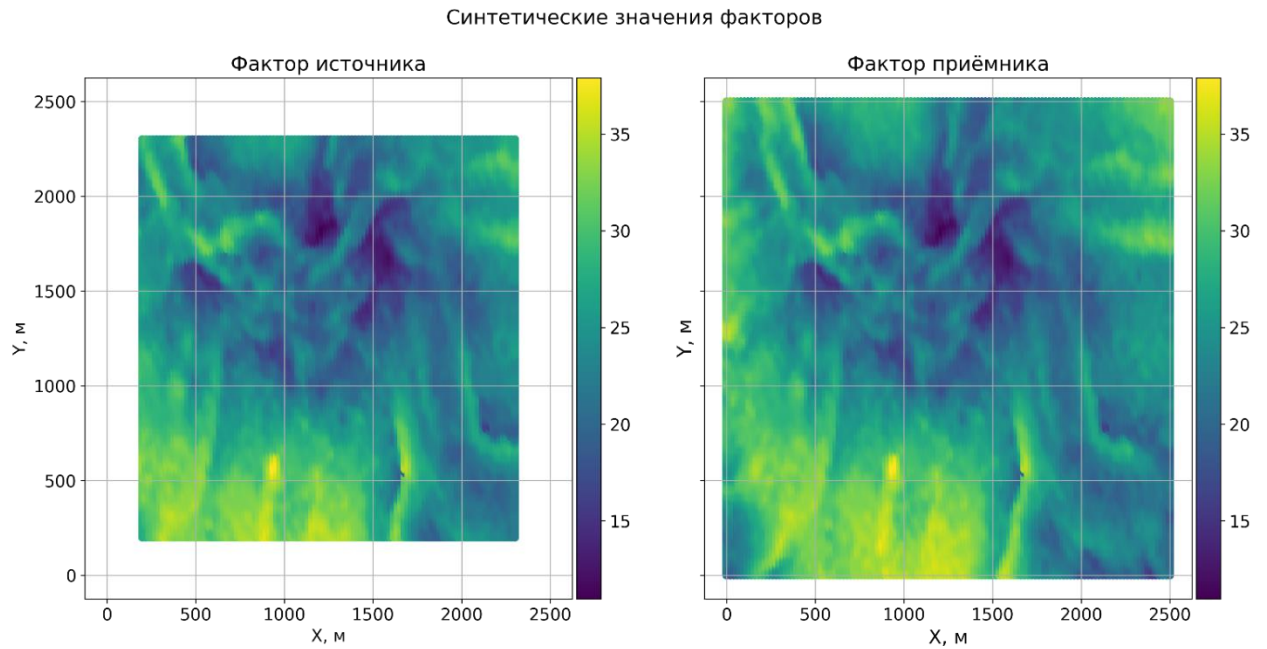


Рисунок 17 – Синтетические значения факторов. На левом рисунке показан фактор источника, на правом — фактор приёмника.

Для начала рассмотрим решение, полученное с помощью итеративного метода LSQR на основе прямоугольной матрицы X (Рисунок 18).

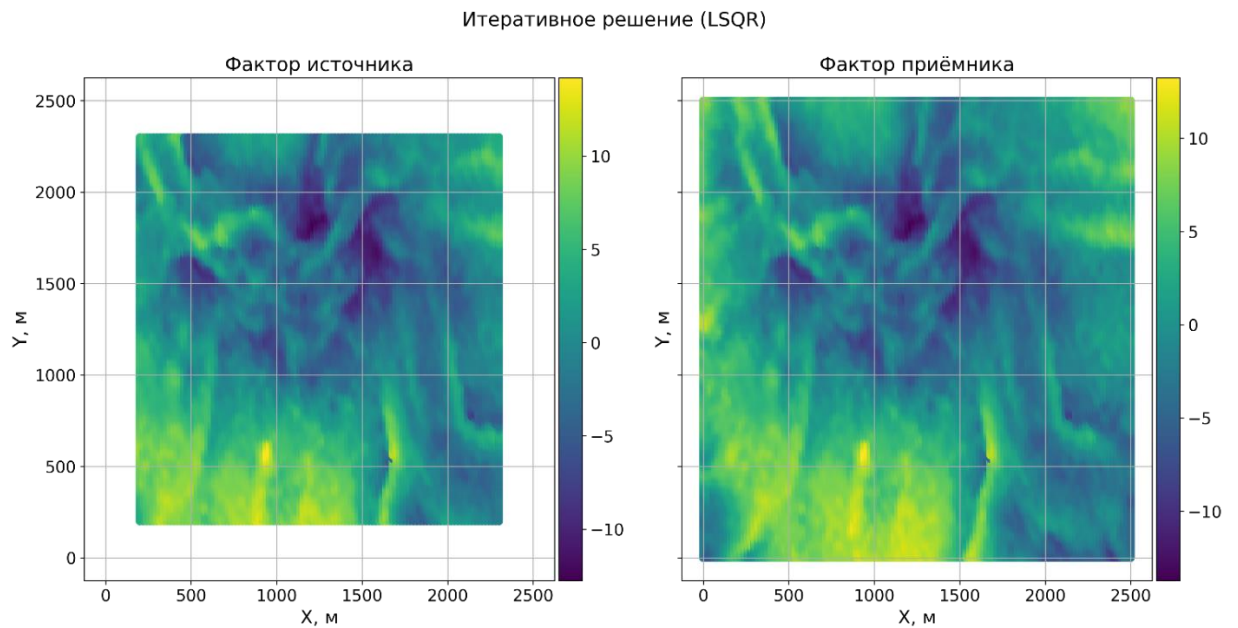


Рисунок 18 – Значения факторов, рассчитанные с использованием итеративного метода LSQR. На левом рисунке представлен фактор источника, на правом — фактор приёмника.

Для поиска решения потребовалось 39 итераций, а время поиска составило 9 секунд. Отклонение от исходных значений наблюдений в среднем составило - $1.111\text{e-}08$.

Перейдем к поиску решения с помощью итеративного метода BICGSTAB на основе квадратной матрицы A (Рисунок 19).

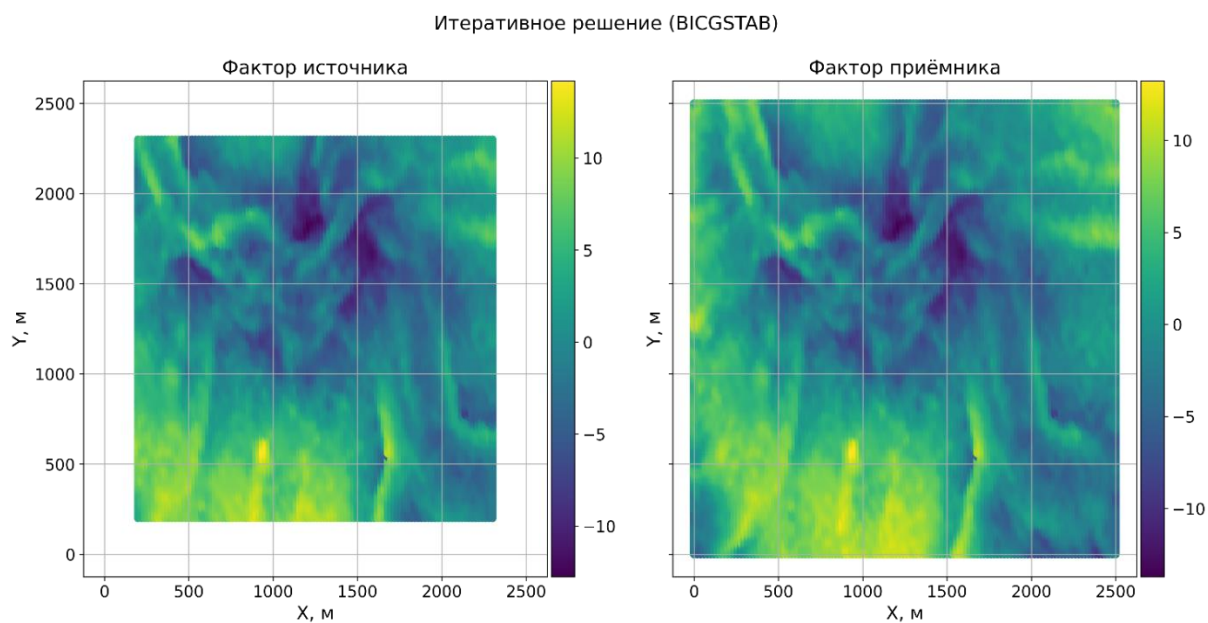


Рисунок 19 – Значения факторов, рассчитанные с применением итеративного метода BICGSTAB. На левом рисунке изображен фактор источника, на правом изображен фактор приемника.

Для поиска решения потребовалось 28 итераций, а время поиска составило 3.3 секунды. Отклонение от исходных значений наблюдений в среднем составило $4.365\text{e-}08$.

Также рассмотрим решение при помощи разложения Холецкого для квадратной матрицы A (Рисунок 20).

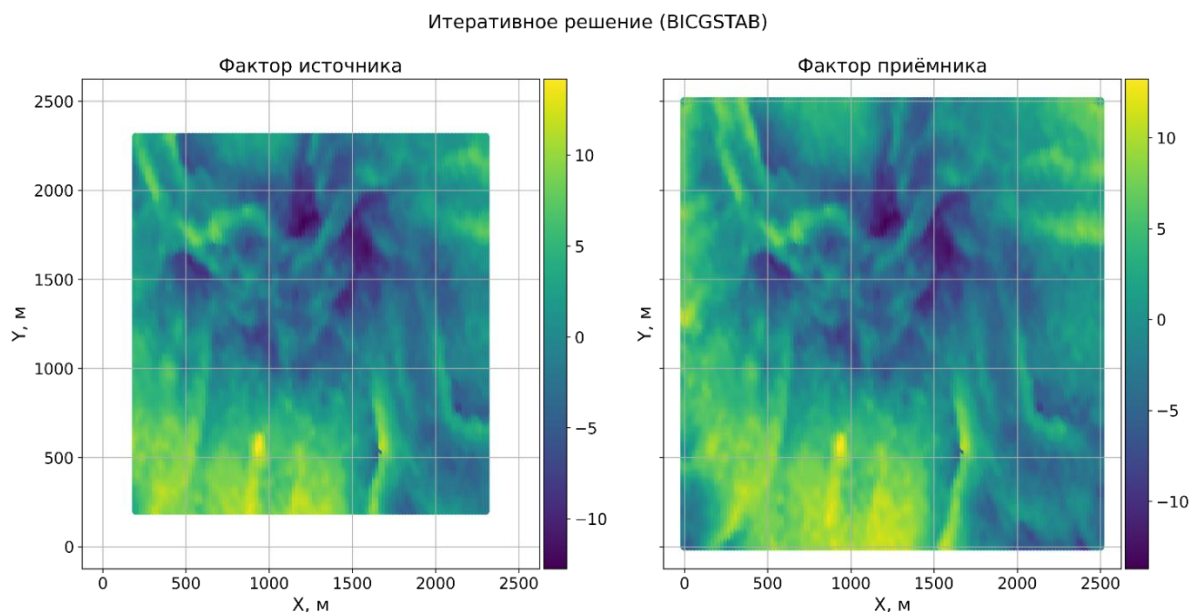


Рисунок 20 – Значения факторов, рассчитанные с использованием прямого решателя — разложения Холецкого. На левом рисунке показан фактор источника, на правом изображен фактор приёмника.

Время получения решения составило 8 минут.

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы: итеративные методы обладают безусловным преимуществом в скорости получения решения, поскольку достаточно легко распараллеливаются между вычислительными ядрами.

В постановке задачи поверхностно-согласованной деконволюции методы прямого обращения могут быть более выгодными, поскольку поверхностно-согласованная деконволюция предполагает получение решения на каждой из частот сигнала (порядка 100 или больше). Получение обратной матрицы в явном виде для системы наблюдений и ее перемножение с вектором наблюдений может оказаться эффективнее, чем запуск итерационного процесса в количестве 100 и более раз. Кроме того, на время сходимости итерационного процесса будут влиять входные данные, а также свойства матрицы, в отличие от прямого обращения с дополнениями.

Еще одной из возможностей ускорения работы итерационных методов является использование предобуславливателей, за счет которых уменьшается

число обусловленности матрицы системы линейных уравнений, что приводит к ускорению сходимости итерационного решателя.

Рассмотрим пример системы наблюдений, включающий 1758276 наблюдений и 1326 точек возбуждения, и 5151 точки приёма.

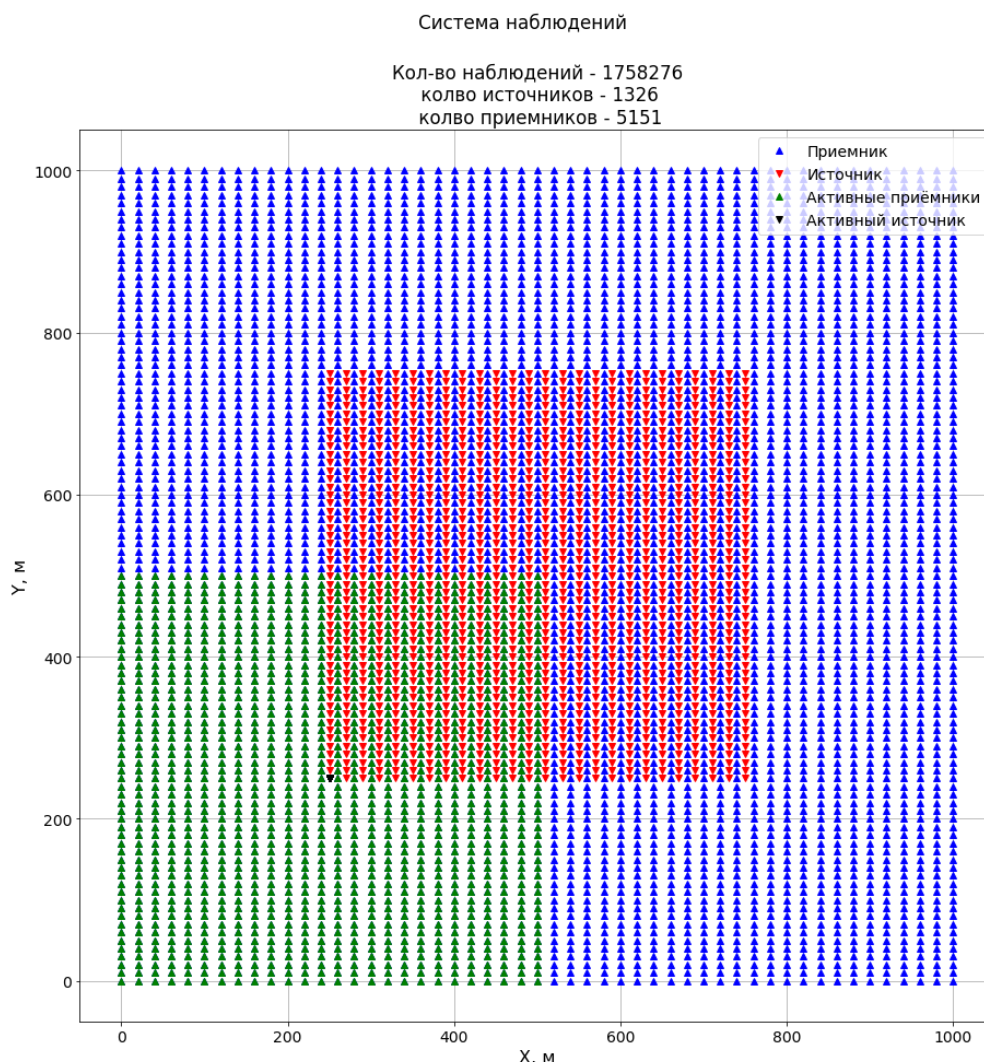


Рисунок 21 – Синтетическая система сейсмических наблюдений. Красными треугольниками обозначено положения источников, синими – положение приёмников. Зеленые треугольники обозначают положение приёмников в активной расстановке, черный треугольник обозначает источник в активной расстановке.

Синтетические данные для данной системы задавались аналогичным образом, как показано на рисунке 17.

Сравнение времени работы решателей в зависимости от точности решения представлено на рисунке 22

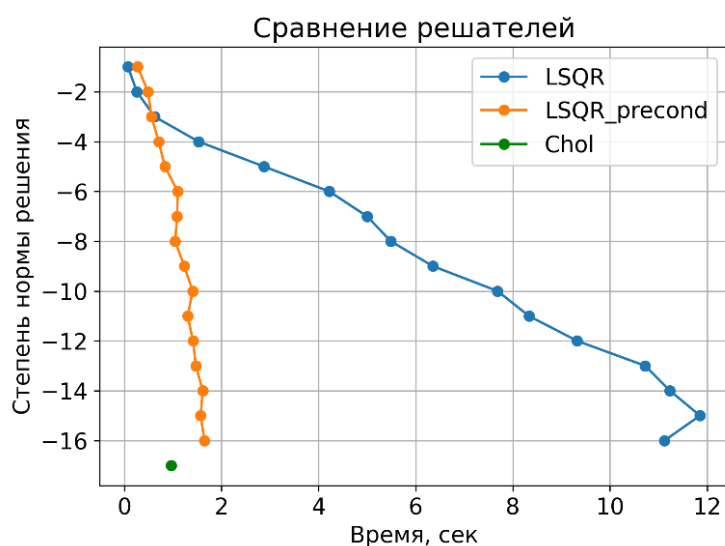


Рисунок 22 – Сравнение итеративных методов (LSQR – синий цвет и LSQR с предобуславливателем Гаусса-Зейделя – оранжевый цвет) и прямого обращения матрицы на основе разложения Холецкого – зеленая точка.

Как видно из рисунка, время получения решения итеративным подходом с использованием предобуславливателя заметно сокращается и приближается к показателям на основе прямого матричного обращения. Тем не менее, при увеличении количества наблюдений и количества факторов разрыв между матричным решением и итеративным решением с предобуславливателем будет увеличиваться, поэтому матричный метод является более эффективным при решении задачи поперечно-согласованной деконволюции.

2.5 Супербинирование – еще один способ исключения неединственно определяемых компонент

В случае площадных 3D систем наблюдения существует дополнительный способ избавления от неединственно определяемых компонент. Этот способ можно определить, как супербинирование, поскольку в его основе лежит объединение нескольких бинов ОГТ в один супербин. Для примера предлагается рассмотреть систему сейсмических наблюдений с рисунка 23 и сингулярное разложение для матрицы $\mathbf{A}$, полученной по данной системе.

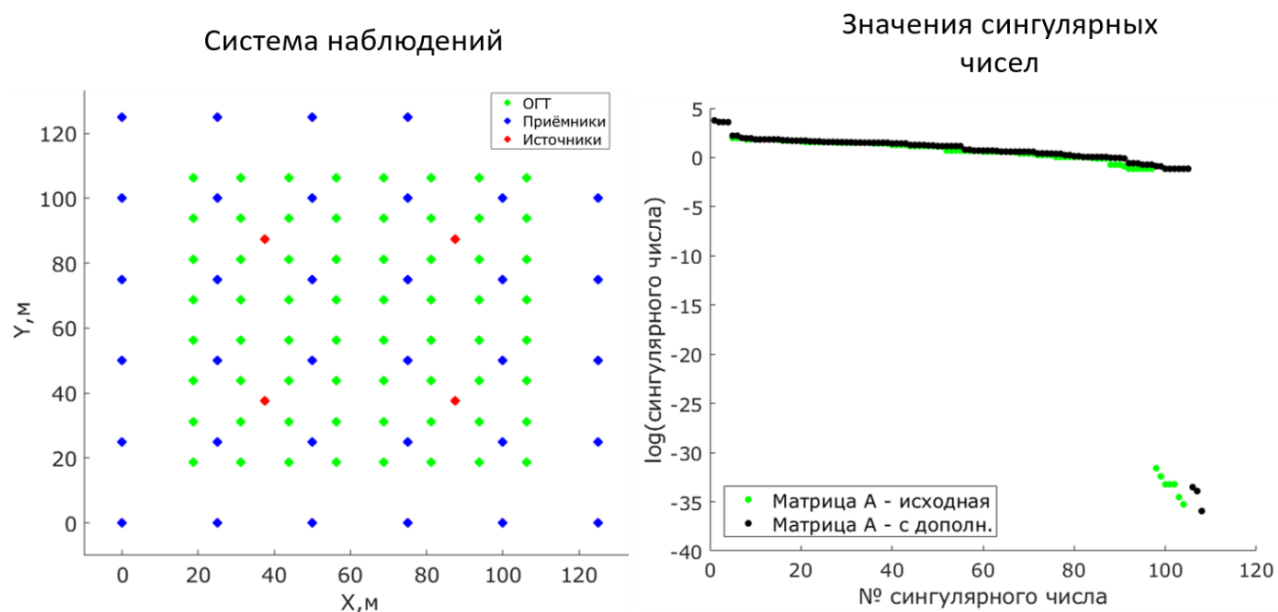


Рисунок 23 – Геометрическое расположение факторов на площади и сингулярное разложение матрицы A для данной системы наблюдений.

На рисунке 23 представлена система сейсмических наблюдений, а также сингулярное разложение матрицы A . Существенно близкие к нулю значения сингулярных чисел позволяют делать вывод о наличии линейно-зависимых компонент в матрице. В исходной матрице A таких компонент наблюдается 7. Исходя из условия (11), убрать линейно-зависимые компоненты можно только для 4 значений. После дополнения матрицы A остается три «плохих» сингулярных числа, а значит устойчивое обращение матрицы остается невозможным.

Рассмотрим пример аналогичной системы, но уже с бинированием системы по фактору ОГТ. На рисунке 24 представлена площадная 3D система наблюдения с бинированием.

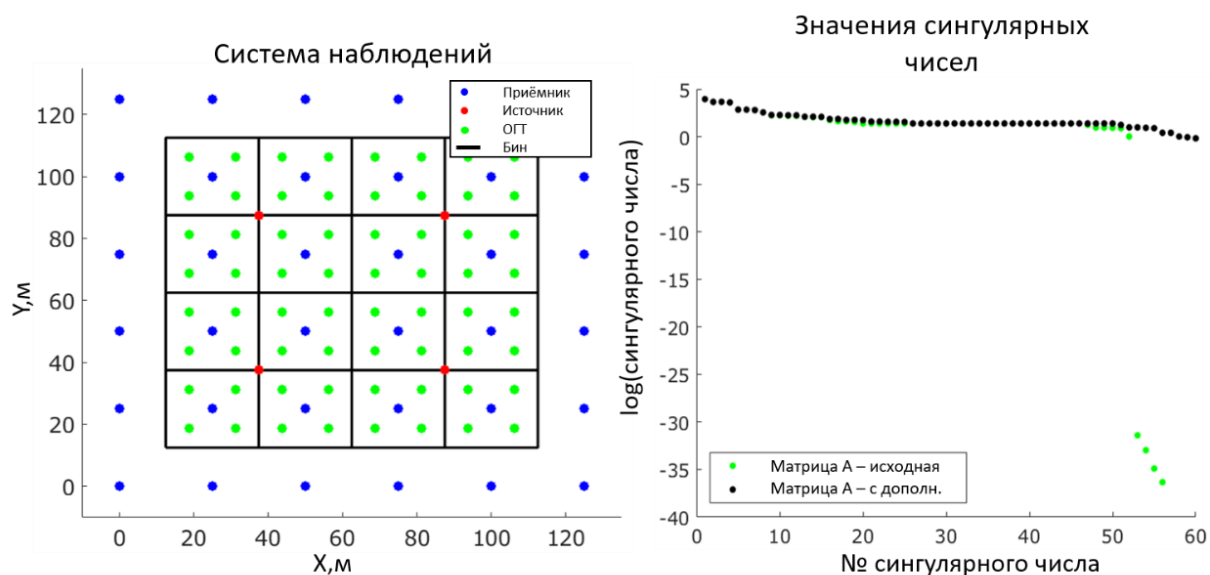


Рисунок 24 – Геометрическое расположение факторов на площади с бинированием и сингулярное разложение матрицы A для данной системы наблюдений. Бинирование позволило учесть оставшиеся 3 некондиционных сингулярных числа, а значит 4-х условий хватает для устойчивого обращения матрицы.

Хотя супербинирование позволяет устранять неоднозначно определяемые компоненты в процессе обработки сейсмических данных, оно остается эвристическим методом, исключая лишь часть таких компонент. Кроме того, сам процесс бинирования приводит к сокращению объема полезной информации, что может быть критично в контексте обработки сейсмических данных.

Выводы

С учетом переопределенности и наличия линейной зависимости в системе уравнений, возникающих при решении задачи поверхностно-согласованной коррекции сейсмических сигналов, был разработан алгоритм, основанный на прямом обращении матрицы и введением дополнений, а именно псевдоаприорной информации.

Разработанный алгоритм представляет четкую последовательность действий, отличную от традиционных алгоритмов (включая возможность

использования итерационного или матричного метода с введением псевдоаприорной информацией):

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 (коррекция остаточной статики);
 - рассчитываются и логарифмируются значения среднеквадратичных амплитуд (коррекция амплитуд) для каждой из сейсмических трасс;
 - с использованием функции автокорреляции рассчитываются и логарифмируются значения амплитудных спектров для каждой из сейсмических трасс (деконволюция).
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 X для решения 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 в виде матрицы X решается методом LSQR: рассчитываются оценки вариаций в сейсмических данных.

Для матричного метода

- переход к квадратичной форме матрицы X (метод наименьших квадратов);
- дополнение матрицы X псевдоаприорной информацией (для обеспечения единственности и устойчивости решения), которая определяется по разложению факторов на полиномы;

- контроль введения псевдоаприорной информации осуществляется с использованием SVD-разложения и локализации малых сингулярных чисел;
- разложение дополненной матрицы выполняется методом Холецкого (подходит для симметричных положительно определенных матриц) для решения системы линейных уравнений и расчёта вариаций в сейсмических данных.

5. На основе вариаций (факторы) в сейсмических данных строятся корректирующие значения для решения задач из п.1 (временные подвижки, амплитудные множители или корректирующие фильтры).

Алгоритм позволяет обрабатывать как данные 2D систем наблюдений [Свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ 2021664234], так и данные 3D систем сейсмических наблюдений [Свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ 2023680901]. Реализация алгоритма была осуществлена на языке Python. Алгоритм также встроен в программу экспресс-обработки инженерных сейсмических данных, полученных методом отраженных волн ОГТ [Свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ 2024683779]. Тестирование выполнялось на синтетических 2D и 3D данных. Реализованный алгоритм обладает возможностью оценки факторов на больших объемах данных.

Глава 3 Исследование особенностей алгоритма поверхностно-согласованной коррекции сейсмических сигналов в матричной и итерационной реализации

Для разработанного алгоритма необходимо определить область применения и ответить на некоторые вопросы:

1. Для каких задач (в поверхностно-согласованной постановке) он будет оптимальным, а какие задачи эффективнее решать с помощью итеративных методов?
2. Следует ли использовать прямое решение системы линейных уравнений с помощью дополнений в случае поверхностно-согласованной деконволюции?
3. Можно ли с помощью алгоритма оценивать длиннопериодные вариации в факторах, если можно, то для каких систем наблюдений это наиболее актуально?
4. Влияет ли связность сейсмических наблюдений в системе на итоговую оценку факторов?

В главе 3 соискатель на основе численных экспериментов отвечает на поставленные вопросы, а также определяет область применения итерационной и матричной реализации алгоритма поверхностно-согласованной коррекции сейсмических сигналов для разных типов задач (коррекция остаточной статики [Mitrofanov, Goreyavchev, 2019], коррекция амплитуд [Кушнарев, Гореевчев и др., 2021а; 2021б; 2022; Митрофанов, Гореевчев и др., 2023в], деконволюция [Гореевчев и др., 2024; Свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ 2024682722]).

3.1 Локализация длиннопериодных вариаций в сейсмических данных

Одной из открытых проблем в поверхностно-согласованной постановке, является задача определения длиннопериодных компонент. Классическими

работами по описанию проблемы определения длиннопериодных компонент являются работы [Wiggins et al., 1976; Kirkham, Poggiagliolmi 1976]. В работе [Wiggins et al., 1976] авторы рассматривают задачу коррекции остаточной статистики (1) в линейно-алгебраической постановке. В линейно-алгебраической постановке задача может быть решена как напрямую, так и итеративно (метод Гаусса-Зейделя) [Young, 2014]. Преимущество итеративного метода заключается в скорости получения решения и в отсутствии необходимости использования больших вычислительных мощностей. При этом важно понимать, что малое число итераций позволяет оценить короткопериодные аномалии, а длиннопериодные аномалии, в этом случае остаются неопределенными. При том, что итерационный процесс сходим (гл. 1, п. 1.2) – важную роль играет скорость сходимости, с увеличением периода аномалии значительно уменьшается скорость его сходимости. Одной из возможных причин возникновения данной проблемы может являться несвязность разных частей системы сейсмических наблюдений.

Если обратиться к системам сейсмических наблюдений, то, например, на рисунке 25, где изображена профильная фланговая система с 160 источниками и 16 приёмниками, видно, что факторы, определенные вдоль направлений i, j , не будут связывать края системы наблюдений в случае, когда длина профиля в несколько раз больше длины расстановки.

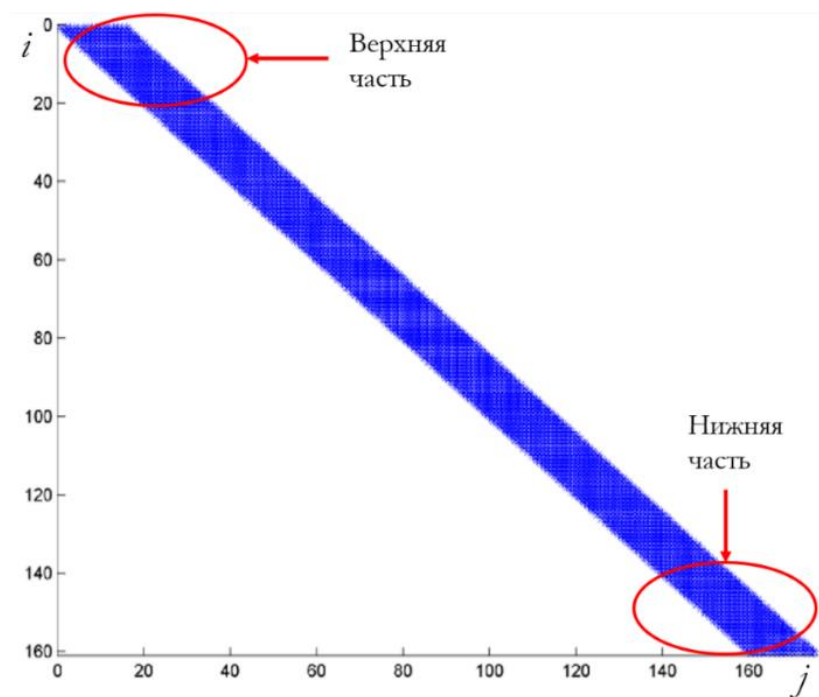


Рисунок 25 – Связность системы наблюдений (160 источников, 16 приёмников в расстановке).

3.2 Численные эксперименты по оценке длиннопериодных составляющих на модельных 2D (профильных) данных

При решении системы уравнений итерационным методом эта связь между наблюдениями теряется, как показано на рисунке 25, а значит и оценка длиннопериодной компоненты осложняется. Детально рассмотрим процесс определения длиннопериодной компоненты в рамках 2-х, 3-х и 4-х факторной модели итерационным способом.

Двухфакторная модель представлена на рисунке 26. Вариации в моделях задавались в виде сигналов синусоидальной формы. Синтетическая расстановка ориентирована на пример реальной расстановки, используемой в морских условиях при инженерных сейсморазведочных работах. Приемная расстановка включает 16 каналов. Количество источников 160.

На рисунке представлены два примера исходных данных и их результаты разделения. Синтетическая система наблюдений включала в себя 160

источников и 16 приёмников. Данные примеры и построены в рамках двухфакторной модели (23).

$$z_{ij} = \alpha_i + \beta_j. \quad (23)$$

Здесь z_{ij} -наблюдения, формирующиеся из суммы двух факторов – двух синусоид, α – фактор, связанный с координатой источника, задавался в виде синусоиды с периодом, укладывающимся в одну длину расстановки (16 приёмников) (Рисунок 26), и для второго примера (Рисунок 27) в два раза больше – 32 приёмника, β – фактор, связанный с координатой приёма, задавался в виде синусоиды с частотой в два раза меньше частоты фактора α .

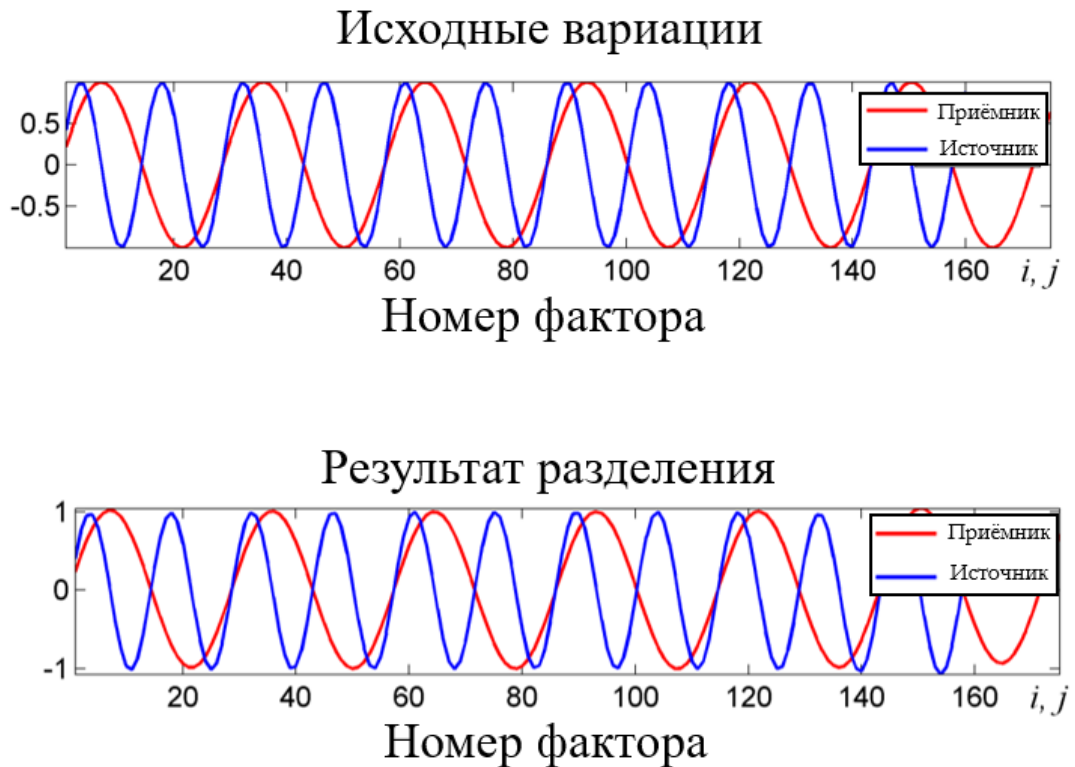


Рисунок 26 – Синтетические данные (период вариаций – 1 длина расстановки), двухфакторная модель, синие линии соответствуют фактору α – координата источника, красные линии фактору β – координата приёма.

Вертикальные оси рисунков показывают амплитуду синусоид, горизонтальные – номер отсчета или номер фактора (i, j).

На рисунке 26 показано решение, полученное на основе итерационного процесса, оно точное и устойчивое для системы наблюдений (160 источников

при длине расстановки 16 приёмников). Период вариаций фактора источника равен длине расстановки, но при его увеличении до полутора расстановок и периода вариаций фактора приёмника до трех расстановок наблюдается понижение точности получаемого решения (рисунок 27).

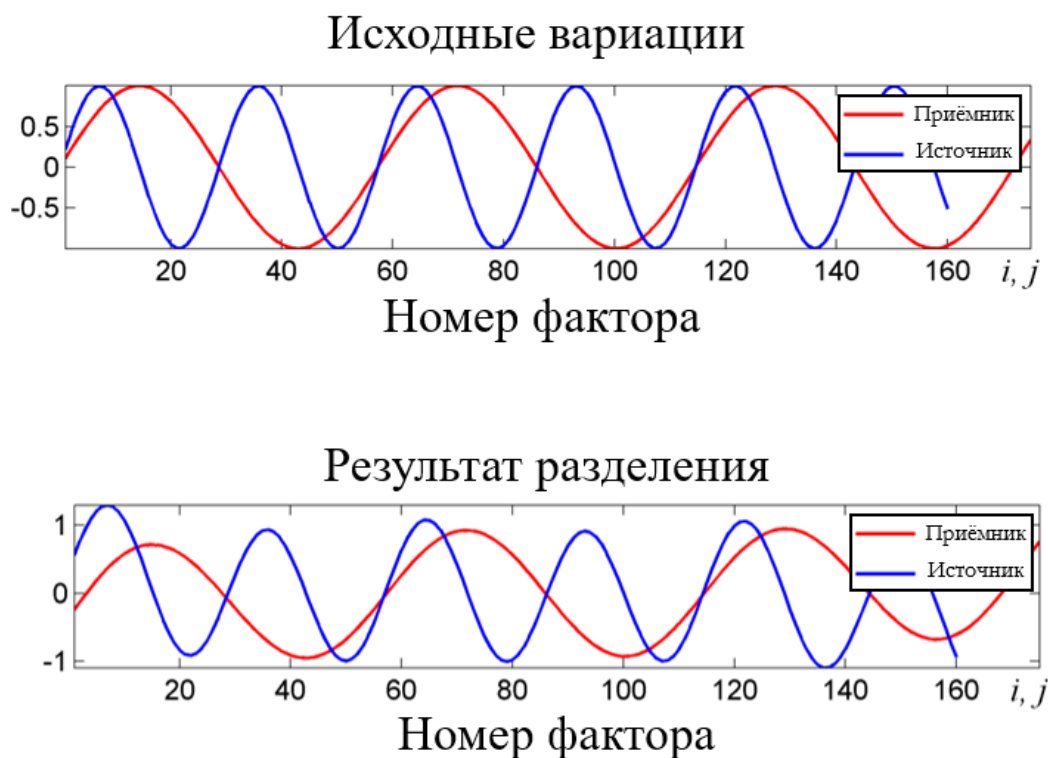


Рисунок 27 – Синтетические данные (период вариаций – 1.5 длины расстановки), двухфакторная модель, синие линии соответствуют фактору α – координата источника, красные линии фактору β – координата приёма.

Вертикальные оси рисунков показывают амплитуду синусоид, горизонтальные – номер отсчета или номер фактора (i, j).

Применение итерационного процесса для разделения факторов с периодом вариаций, превышающим полторы длины расстановки, приводит к неточному решению. Решение осложняется неоднозначно определяемыми компонентами факторной модели. Для двухфакторной модели, где неоднозначно определяется только постоянная составляющая, возникает перераспределение её величины вдоль профиля.

Кроме того, наличие длиннопериодных компонент (период превышает полторы длины расстановки) как в факторе источника, так и в факторе

приёмника, приводит к неоднозначности их локализации. Однако эта неоднозначность обусловлена не самой факторной моделью, а системой наблюдения, которая не обеспечивает достаточной связности между наблюдениями и параметрами модели.

Рассмотрим примеры, построенные в рамках трехфакторной модели. В предыдущую модель (23) добавлен фактор, связанный с координатой общей центральной точки (γ) – модель (24)

$$z_{ij} = \alpha_i + \beta_j + \gamma \frac{i+j}{2}. \quad (24)$$

На рисунке 28 представлены 2 примера для разных систем наблюдений – левый ряд рисунков (160 источников, 16 приёмников), правый ряд рисунков (160 источников, 200 приёмников). Частоты синтетических синусоид совпадают и заданы аналогично примерам из рисунка 29 (один период частоты фактора по источнику укладывается в длину расстановки – 16 приёмников). Частота синусоиды, связанной с фактором ОЦТ, в восемь раз меньше частоты, связанной с фактором источника.

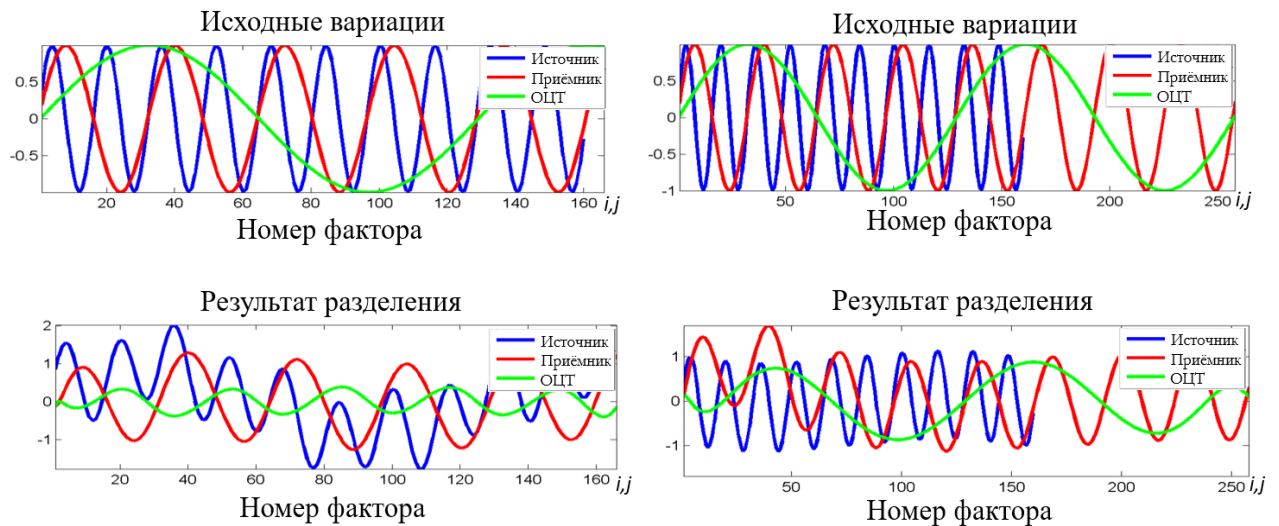


Рисунок 28 – Синтетические данные, трехфакторная модель, синие линии соответствуют фактору α – координата источника, красные линии фактору β – координата приёма, зелёные – фактору γ – координата ОЦТ. Вертикальные оси рисунков показывают амплитуду синусоид, горизонтальные – номер отсчета или номер фактора (i, j).

Как видно из рисунка 28, аналогичные закономерности, как и в примере с двухфакторной моделью, наблюдаются и здесь, результат разделения синусоид при низкой базе наблюдения (16 приёмников) – неточен, но при увеличении базы наблюдения результат становится более удовлетворительным. Результаты разделения для расстановок 16 приёмников и 200 приёмников были построены при одном числе итераций – 10 итераций. В случае 16 канальной расстановки среднеквадратичное отклонение полученных оценок относительно модельных данных составляет 15 %. В случае 200 канальной расстановки среднеквадратичное отклонение полученных оценок относительно модельных данных составляет менее 3%. Эти цифры говорят о том, что увеличение базы наблюдений увеличивает скорость сходимости итерационного метода оценки факторов. Такие же закономерности наблюдались и в других примерах (двух и четырех факторные модели).

Рассмотрим примеры, построенные в рамках четырехфакторной модели (Рисунок 29). Эта модель включает в себя четвертый фактор – фактор, связанный с равными удалениями (25).

$$z_{ij} = \alpha_i + \beta_j + \frac{\gamma_{i+j}}{2} + \xi_{i-j}. \quad (25)$$

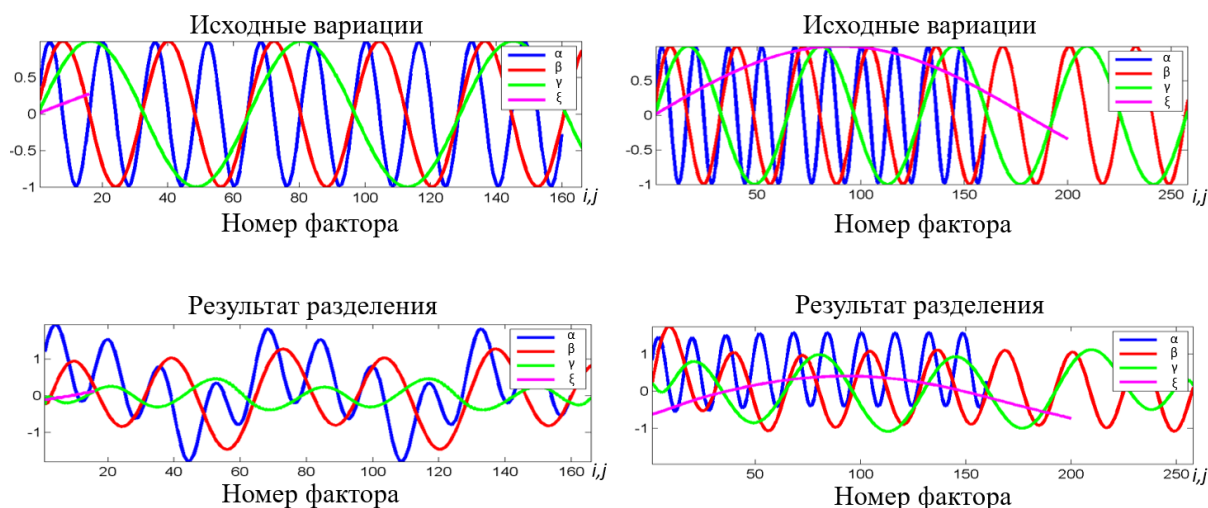


Рисунок 29 – Синтетические данные, четырехфакторная модель, синие линии соответствуют фактору α – координата источника, красные линии фактору β – координата приёма, зелёные – фактору γ – координата ОЦТ,

фиолетовые – фактору ξ – равные удаления. Вертикальные оси рисунков показывают амплитуду синусоид, горизонтальные – номер отсчета или номер фактора (i, j).

Как и в предыдущем примере, разделение дает более точный результат при увеличении базы наблюдения (200 приёмников) [Горевачев, Митрофанов, 2018].

3.3 Матричный метод при оценке длиннопериодных составляющих на модельных 2D (профильных) данных

Для демонстрации решение проблемы несвязности разных частей системы наблюдений с рисунка 25 был составлен синтетический набор вариаций в рамках 3-х факторной модели источник-приёмник-ОСТ (на рисунке 30 представлены вариации остаточных времен). Каждая из вариаций описывалась синусоидой определенной частоты. Частоты определялись исходя из длины расстановки, то есть один период колебаний вариаций на координате источника укладывался в 1.5 длины расстановки, один период колебаний вариаций на координате приёмника в 3 длины расстановки, один период колебаний вариаций на координате ОСТ в 6 длин расстановок.

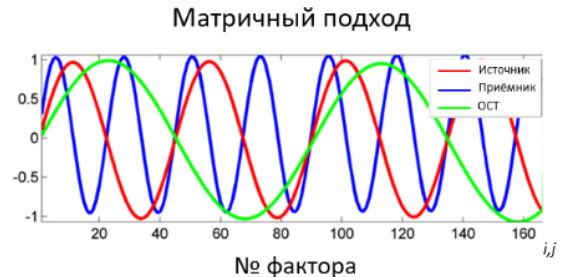
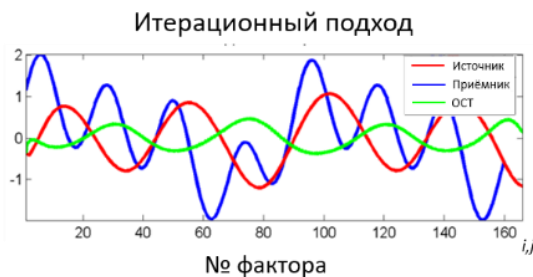
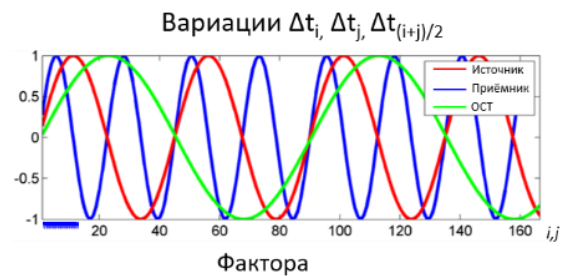
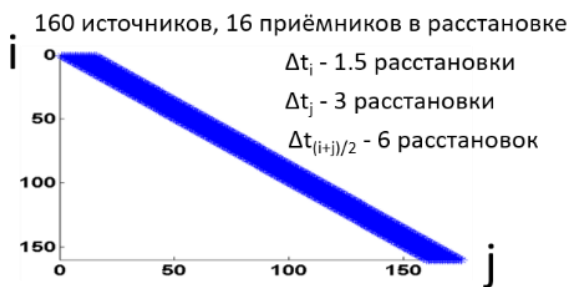


Рисунок 30 – Сравнение оценок вариаций в сейсмических данных двумя методами (матричное дополнение и итерационное решение) в рамках трехфакторной модели (источник – приёмник – ОСТ).

Исходные вариации представлены на верхнем правом рисунке. Цветом обозначены факторы, красный – источник, синий – приёмник, зеленый – ОСТ.

Как видно из рисунка, разделение на факторы при помощи итерационного метода не дает верного решения. Результаты, полученные итерационным методом, описывают типичный пример проблемы определения длиннопериодных вариаций.

Матричный метод обеспечивает точное разделение. Отличия в исходных вариациях и матричном методе могут объясняться наличием константы и линейной составляющей, которые были введены на основании условия (20) для разрешения системы линейных уравнений. Важным свойством дополнения матрицы является обеспечение связности разных частей системы наблюдений. Именно это свойство позволяет производить наиболее точную оценку низкочастотных вариаций в профильных сейсмических данных.

Таким образом, в сравнение с итерационным решением матричный метод позволяет проводить оценку низкочастотной составляющей вариации сейсмических данных. Это возможно благодаря введению дополнительных условий, обеспечивающих связность наблюдений из разных частей системы (Рисунок 25, 30). Уточнение результата итерационного метода возможно только при увеличении длины расстановки.

Помимо итерационного метода к разложению на факторы, также возможно получение решения при помощи псевдообратной матрицы. По своей идее этот подход является матричным за исключением возможности внесения псевдоаприорной информации в ходе решения.

На рисунке 31 представлено сравнение методов – получение псевдообратной матрицы и решения при помощи матричного дополнения. Исходные вариации задавались в виде синусоид разной частоты, фланговая

система наблюдений содержала 160 источников и 96 каналов в расстановке. Соотношение сигнал/шум было задано на уровне 2.

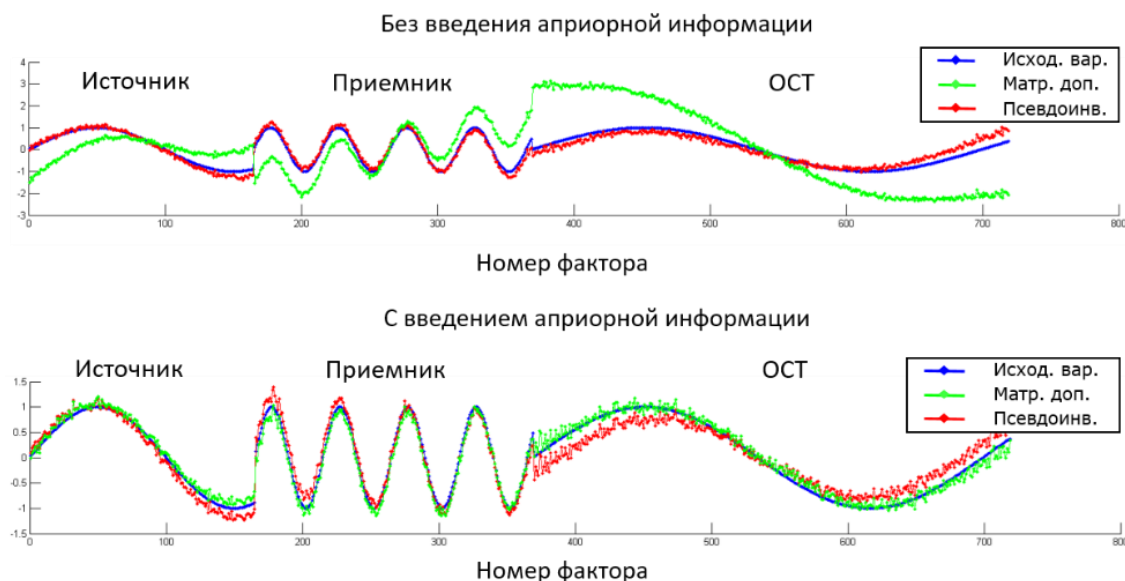


Рисунок 31 – Сравнение оценок вариаций в сейсмических данных двумя методами (матричное дополнение и псевдоинверсия) в рамках трехфакторной модели (источник – приемник – ОСТ).

Исходные вариации заданы в виде синусоид разной частоты (синий цвет). Результат разделения при помощи матричного дополнения – зеленый цвет, при помощи псевдоинверсии – красный цвет.

Как видно из верхнего рисунка, метод дополнений работает с точностью до константы и линейной составляющей, которые зафиксированы для разрешения системы в виде абстрактных коэффициентов, поэтому на верхнем рисунке более точное решение дает метод псевдоинверсии. Но на нижнем рисунке, результат метода дополнений становится более точным, поскольку в нем есть возможность внесения априорной информации (в данном случае были использованы модельные данные микросейсмокаротажа для оценки вариаций в остаточных временах, в случае оценки вариаций динамических характеристик в качестве априорной информации должна быть использована частотная характеристика формы сигнала).

3.4 Численные эксперименты и сравнительный анализ методов (итерационного и матричного) в определении длиннопериодных вариаций на модельных 3D (площадных) данных

В случае площадных систем наблюдений проблема определения длиннопериодных компонент должна влиять на результат разделения в меньшей степени, поскольку наблюдения более взаимосвязаны между собой в силу геометрического расположения точек источников и приёмников.

Для сравнения методов (итерационного и матричного) на трехмерных данных была создана синтетическая система наблюдений, включающая 14706 источников, 20301 точку приёма, всего в системе получилось 7294176 наблюдения (Рисунок 32). Вся площадь составила 4 км², длина активной расстановки 300 м. Размеры расстановки были определены исходя из доступных вычислительных мощностей на стандартном ПК. При этом для реальной расстановки можно масштабировать путем домножения на коэффициент 10 (40 км², длина расстановки 3000 м). Предполагается, что изменение размеров расстановки повлияет только на время расчета. Все численные эксперименты ниже проводились на процессоре Intel i5-8600K с частотой 3.60 ГГц с оперативной памятью 32 Гб.

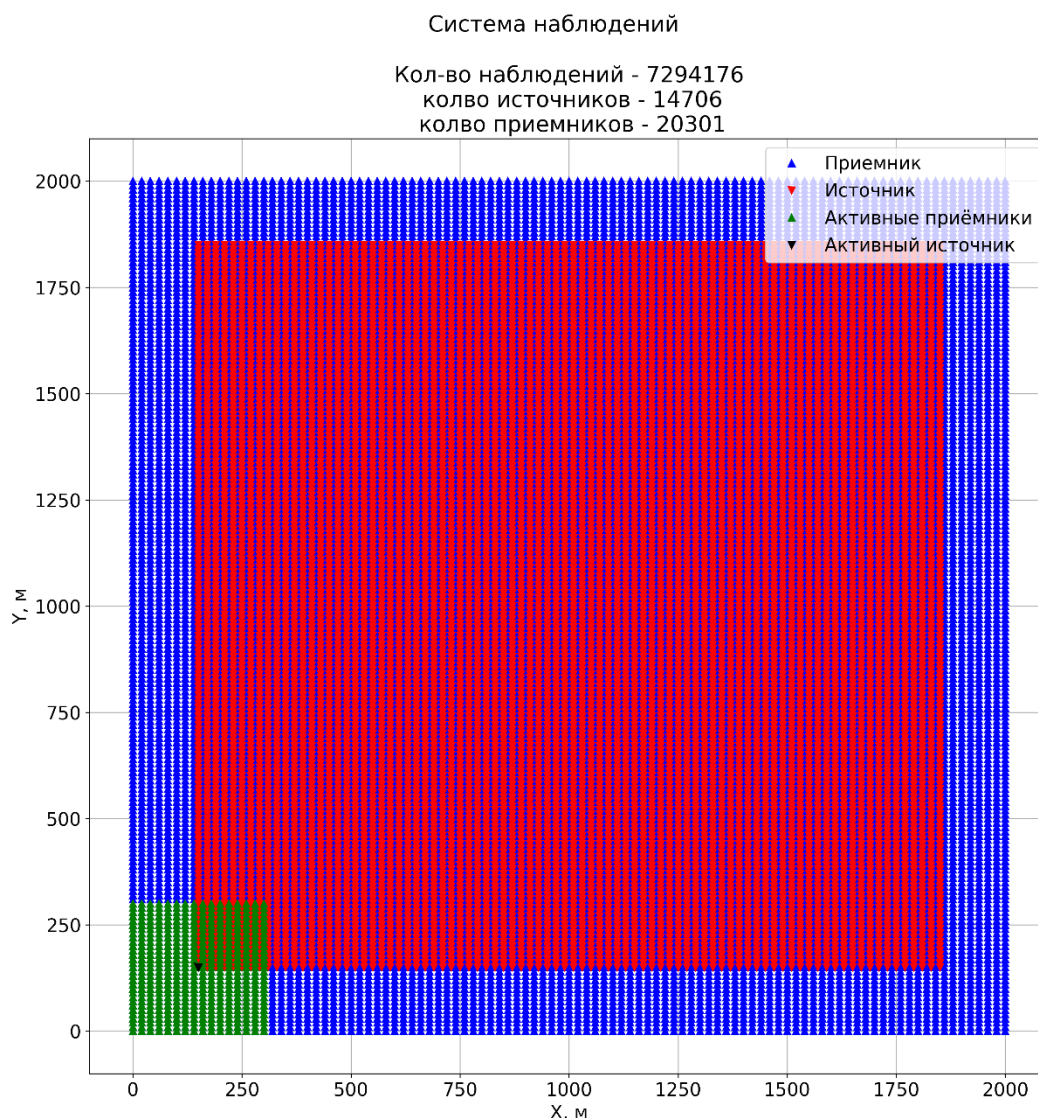


Рисунок 32 – Синтетическая система сейсмических наблюдений. Красными треугольниками обозначено положения источников, синими – положение приёмников. Зеленые треугольники обозначают положение приёмников в активной расстановке, черный треугольник обозначает источник в активной расстановке.

Рассмотрим примеры в рамках 2-х факторной модели (источник – приемник). Модельные значения факторов были заданы в виде карт (Рисунок 33). При этом фактор источника был дополнительно сглажен, чтобы представлять собой длиннопериодную вариацию, которая не укладывается в размер 1.5 длин расстановок. Кроме того, в факторах содержится средняя величина (константа), которую необходимо учитывать при сравнении с полученными решениями.

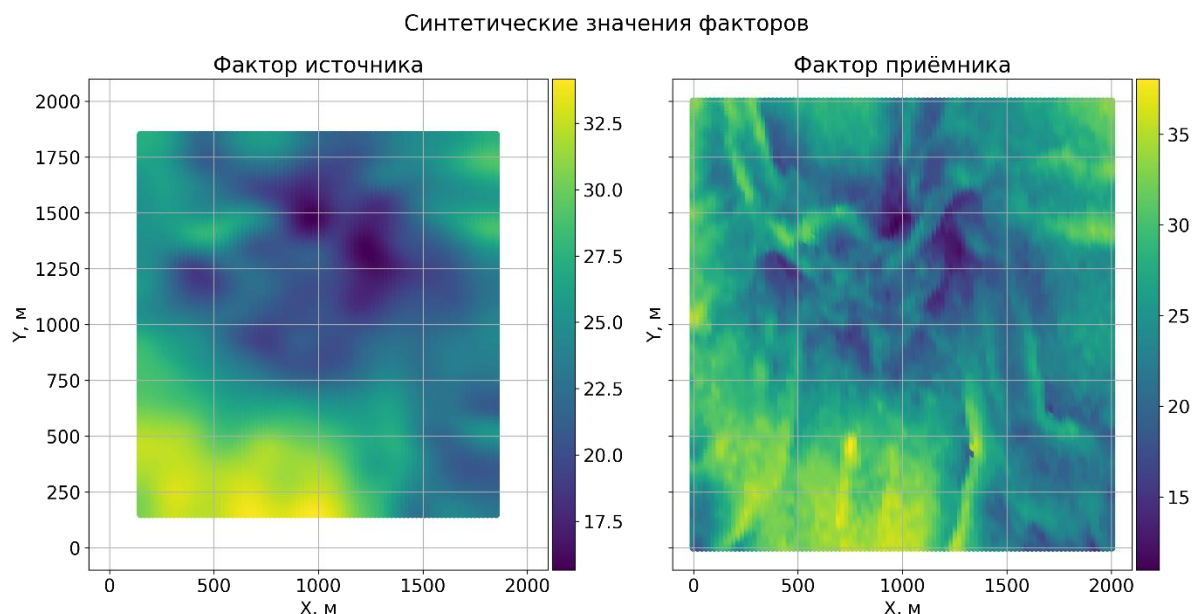


Рисунок 33 – Синтетические значения факторов. Левый рисунок – фактор источника (модель длиннопериодной вариации), правый рисунок – фактор приёмника.

Исходя из факторной модели (23) был создан вектор наблюдений, который затем использовался при решении системы линейных уравнений, как матричным, так и итеративным методами. В качестве методов поиска решения использовались итеративные решатели LSQR, BICGSTAB и в качестве матричного решения – разложение Холецкого на основе реализованного алгоритма с включением матричного дополнения.

В случае площадных систем наблюдений для контроля свойств матрицы и определения неединственно определяемых компонент воспользуемся SVD-разложением (Рисунок 34).

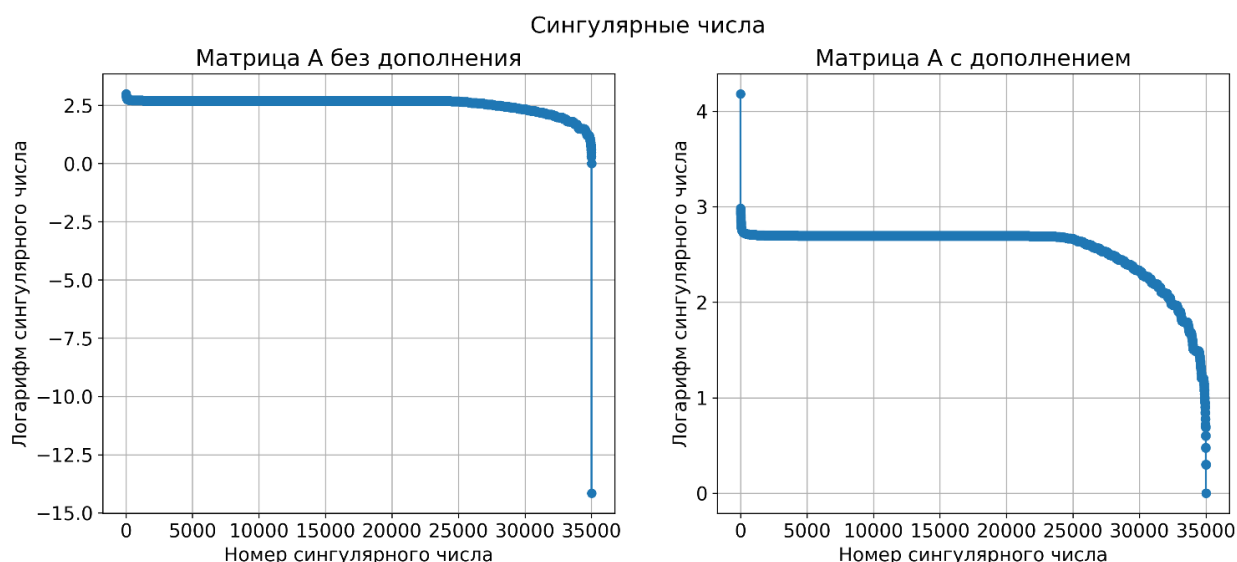


Рисунок 34 – SVD – разложение матрицы A (левый рисунок) для системы наблюдений с рисунка 32, SVD – разложение матрицы A после дополнения константной (правый рисунок).

Как видно из левого рисунка, SVD-разложение матрицы A для системы наблюдений с рисунка 32 обладает одним малым значением, что соответствует неоднозначному определению значения константы, как и в случае профильных данных для 2-х факторных моделей. В результате введения псевдоаприорной информации и фиксации значения константы малое значение уходит, что показано на правом рисунке на графике значений сингулярных чисел, а значит обращение и разложение матрицы существует.

Для разложения использовались стандартные библиотеки в среде Python (numpy, scipy). В первую очередь было получено решение на основе матричного разложение с дополнением. Время счета составило ~ 74.7 секунд. Результат представлен на рисунке 35. Отклонение полученного решения от истинного в среднем составило $-3.068e-16$, норма L2 между полученным и истинным решениями составила $1.566e-10$. Полученные показатели степеней стали ориентиром для получения решения в рамках итеративных методов.

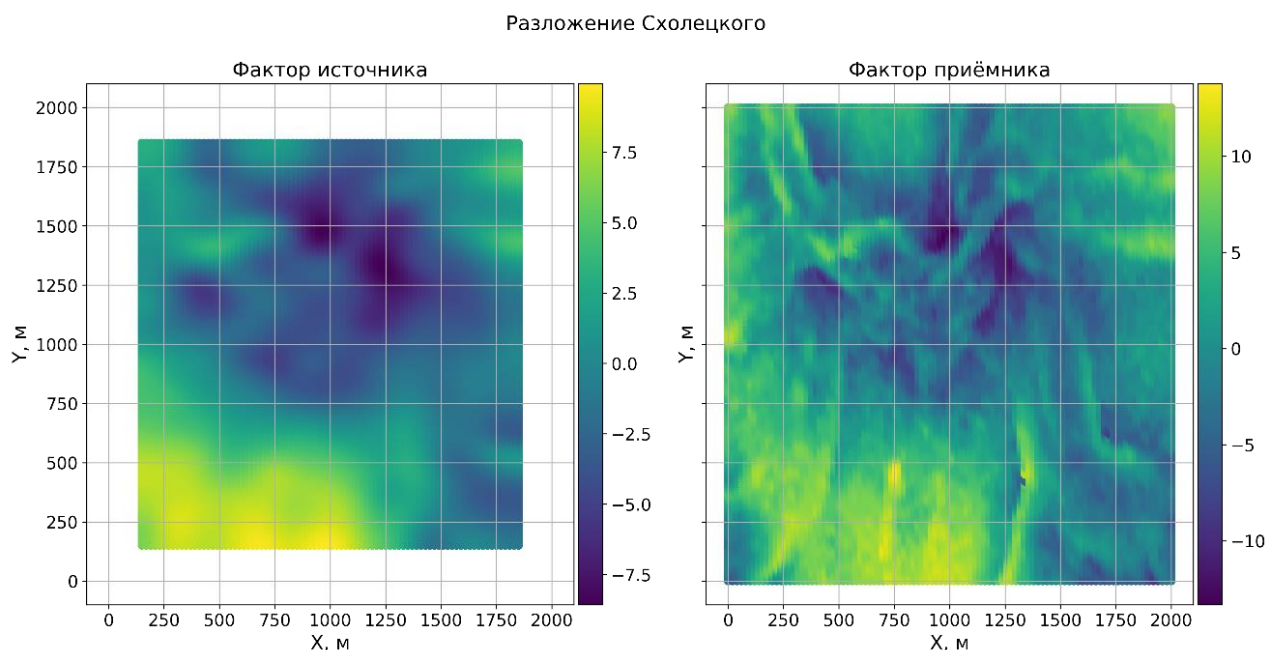


Рисунок 35 – Оценка факторов на основе разложения Холецкого в рамках алгоритма дополнения матрицы. Левый рисунок – оценка фактора источника, правый рисунок – оценка фактора приёмника.

Одним из параметров итеративных методов является допустимое отклонение полученного решения от правой части уравнения (tolerance). И для метода BICGSTAB и для метода LSQR были протестированы значения параметра от $1e-1$ до $1e-16$ с шагом в одну степень на понижение. Также была произведена оценка количества итераций, необходимых для достижения конкретного значения допустимого отклонения. Результат оценки сходимости итеративных решателей представлен на рисунке 36.

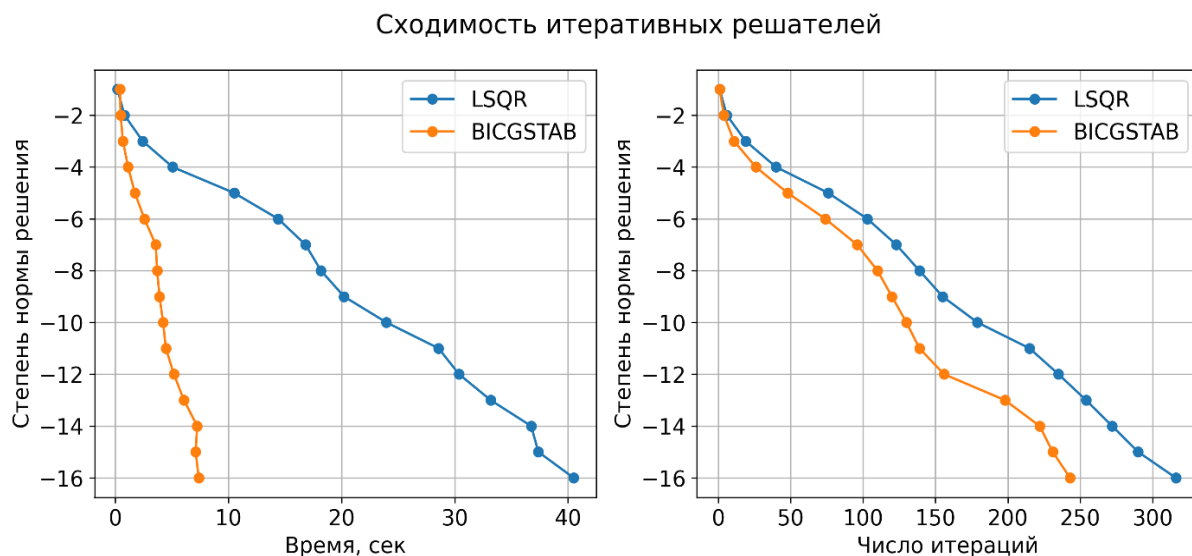


Рисунок 36 – Сравнение сходимости итеративных решателей. Левый рисунок – зависимость допустимого отклонения (логарифмический масштаб) от времени вычисления. Правый рисунок – зависимость допустимого отклонения (логарифмический масштаб) от количества итераций, необходимого для получения решения. Синяя линия – метод LSQR, оранжевая линия – метод BICGSTAB.

Решение, сопоставимое по точности с решением на основе матричного разложения Холецкого, для метода BICGSTAB было получено примерно за 7 секунд и за 245 итераций, для метода LSQR примерно за 40 секунд и за 310 итераций. Оценки факторов по каждому из методов представлены на рисунках.

Результаты оценки факторов итеративным методом BICGSTAB и итеративным методом LSQR представлены на рисунках 37 и 38, соответственно.

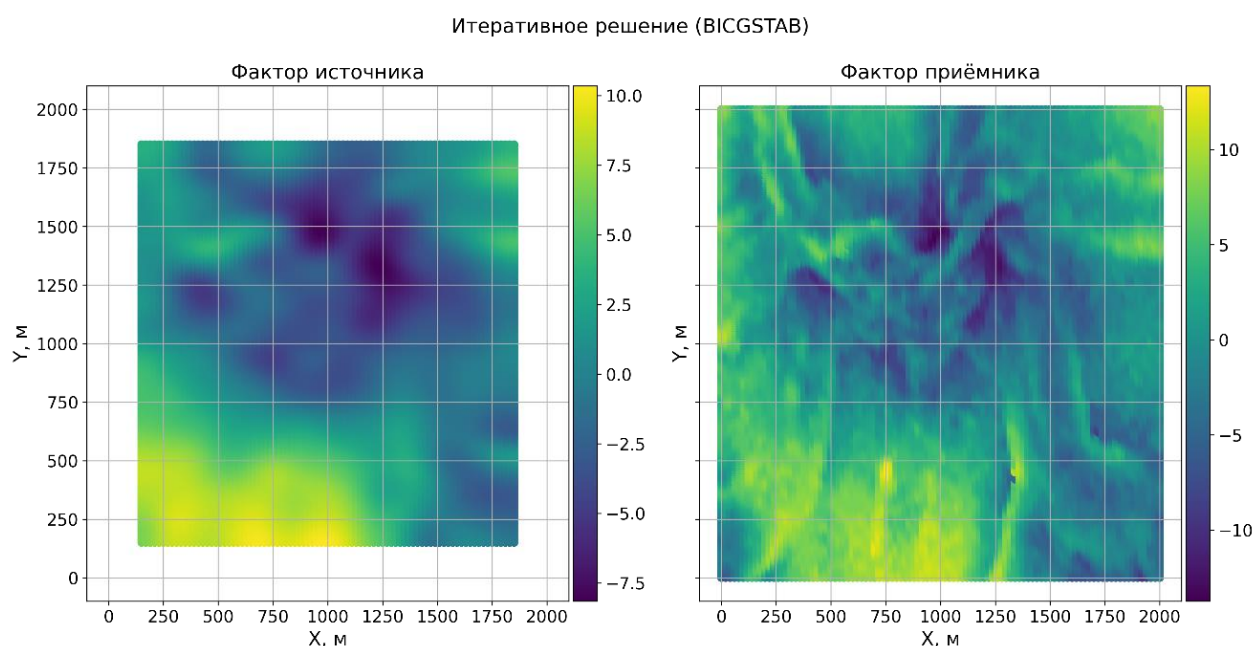


Рисунок 37 – Оценка факторов на основе итеративного метода BICGSTAB.

Левый рисунок – оценка фактора источника, правый рисунок – оценка фактора приёмника.

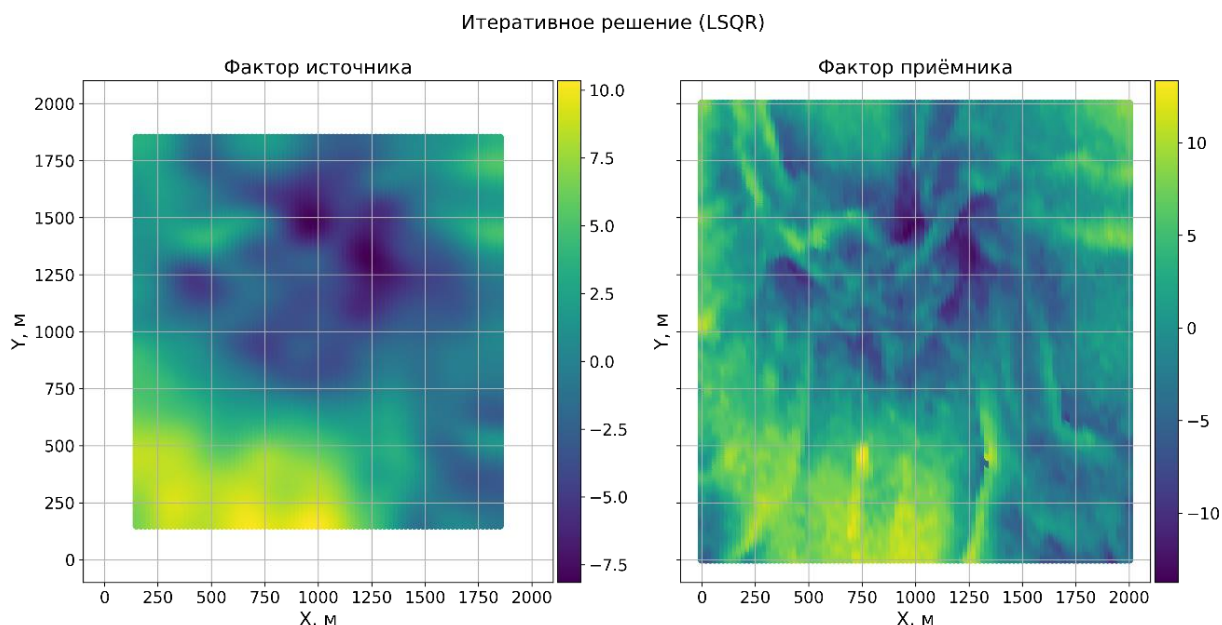


Рисунок 38 – Оценка факторов на основе итеративного метода LSQR. Левый рисунок – оценка фактора источника, правый рисунок – оценка фактора приёмника.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что решения достаточно схожи в сравнение с истинными значениями факторов (гистограммы разности на рисунке 39), в том числе и в оценке длиннопериодных вариаций на компоненте источника. Вопрос лишь в «стоимости» решения – времени вычислений и точности получаемых оценок. Зачастую при работе с реальными данными в производственных пакетах допустимое отклонение в итеративных решателях от решения заложено на уровне от $1e-3$ до $1e-5$, что является вполне разумной практикой, поскольку скорость сходимости решателя будет сильно зависеть как от уровня шума, так и от сложности факторной модели, а оценка длиннопериодной компоненты считается заведомо неточной. Для поиска более точного решения в производственных пакетах предусмотрен выбор количества итераций. И в ходе обработки специалисты должны самостоятельно принимать решение о сложности входных данных, выборе факторной модели и необходимого числа итераций для решения задачи. Время счета для сложных (наличие шума, мультифакторная модель, наличие длиннопериодных вариаций)

задач существенно увеличится. В этих случаях алгоритм обращения матриц с дополнением через разложение Холецкого выглядит хорошей альтернативой, поскольку время решения не будет зависеть от сложности входных данных, при этом точность решения будет иметь высокий уровень.

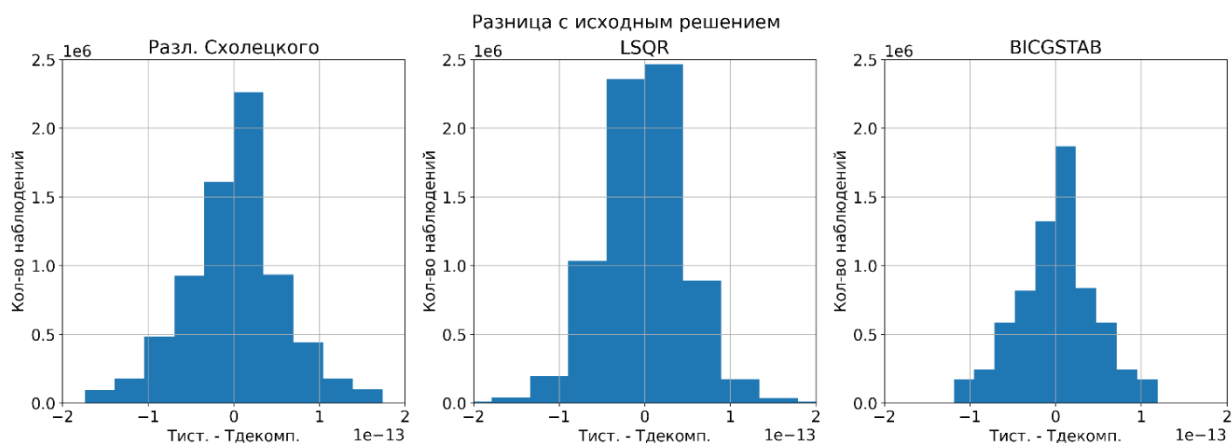


Рисунок 39 – Гистограммы, построенные по разностям модельных входных данных и оценок, полученных на основе различных методов. Левая гистограмма – обращение через разложение Холецкого, центральная гистограмма – итеративный метод LSQR, правая гистограмма – итеративный метод BICGSTAB.

3.5 Сопоставление результатов методов (итерационного и матричного) в решении задачи поверхностно-согласованной деконволюции

В рамках решения задачи поверхностно-согласованной деконволюции проведено на модельных данных исследование применимости матричного метода.

На основе свертки импульсов Рикера с центральными частотами 30, 100, 250 Гц задан модельный сигнал в источнике. Вариации этого сигнала на разных ПВ и ПП задавались в виде отдельного импульса Рикера, но с изменением частоты: от источника к источнику центральная частота увеличивалась, начиная с 250 Гц с шагом 25 Гц, от приёмника к приёмнику — с 50 Гц с шагом 5 Гц. Основной сигнал локализован на отметке 1000 мс. В систему наблюдения

входили 5 точек возбуждения и 23 точки приёма. Исходный сигнал и результаты деконволюции показаны на рисунке 40.

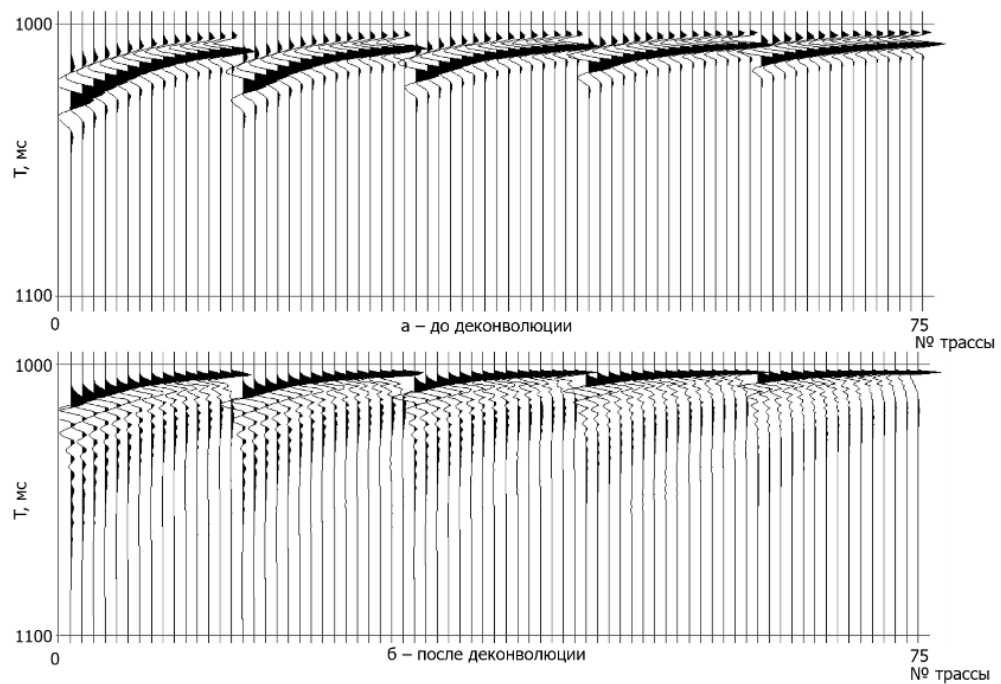


Рисунок 40 – Выполнение деконволюции на синтетических данных (до – верхний рисунок, после – нижний).

Амплитудные спектры синтетических сигналов до и после деконволюции представлены на рисунке 41.

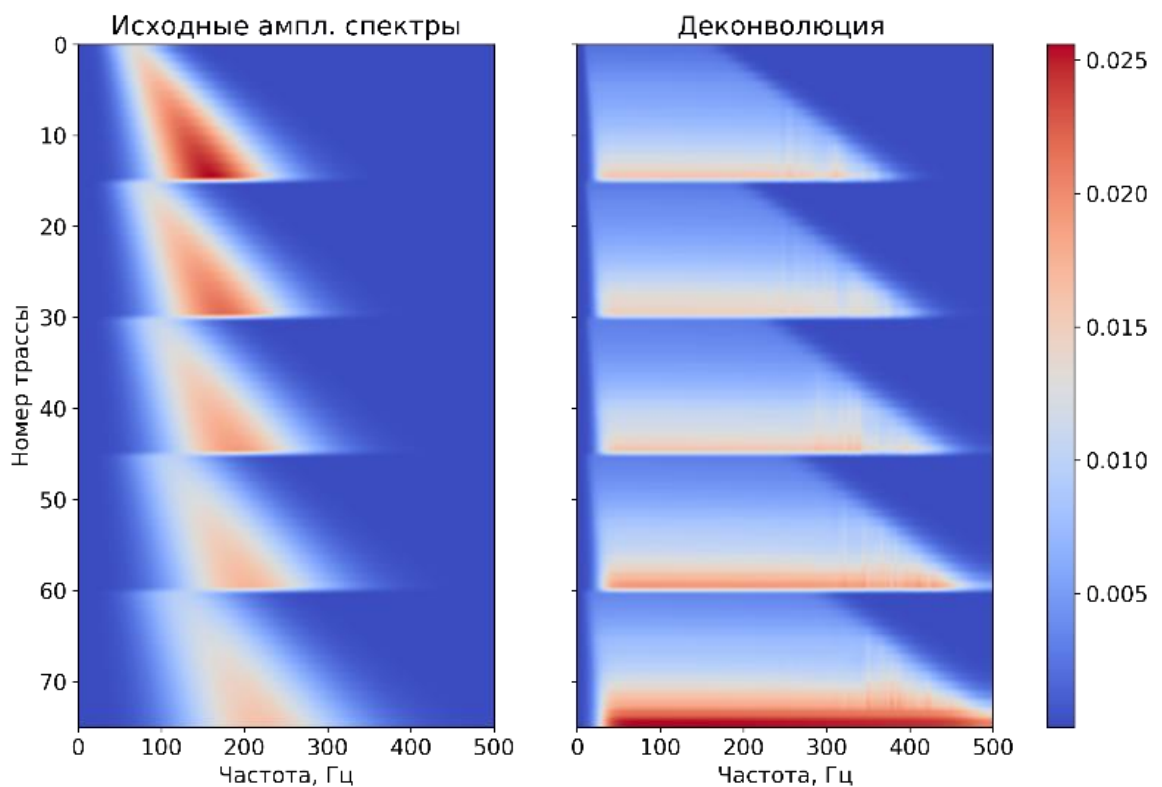


Рисунок 41 – Амплитудные спектры синтетических сигналов (до – левый рисунок, после – правый).

Для проведения поверхностно-согласованной деконволюции дополнительно использованы итеративные методы решения (LSQR, BICGSTAB), а также метод разложения Холецкого дополненной матрицы. Влияние точности решения и времени вычислений после увеличения числа наблюдений до 15 000 и числа факторов до 3000 отображено на рисунке 42.

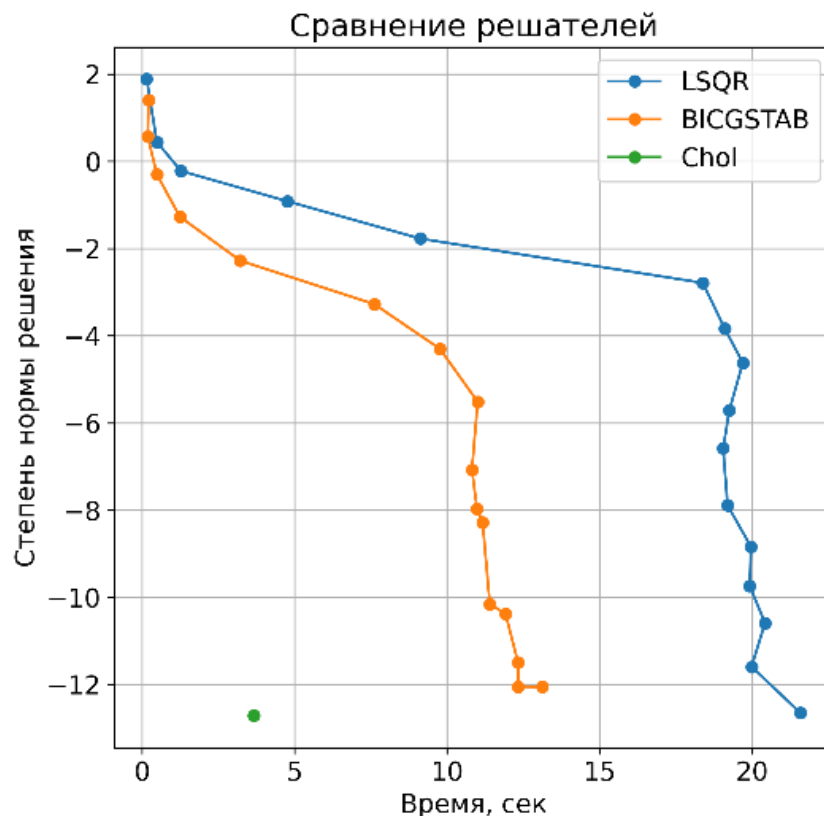


Рисунок 42 – Зависимость точности полученного решения от времени вычисления. Синий цвет обозначает итеративный метод LSQR, оранжевый — итеративный метод BICGSTAB, а зеленая точка соответствует прямому решению через разложение Холецкого.

Анализ полученной зависимости показывает, что поверхностно-согласованная деконволюция с применением итеративных методов требует значительно больше времени для достижения точности, сравнимой с результатами, получаемыми с помощью матричного алгоритма. С увеличением объема наблюдений разрыв по времени вычислений между прямым и итеративным решением будет увеличиваться, поскольку при итеративном

методе вычисления корректирующих фильтров происходит через независимый запуск решателя для каждой частоты, в отличие от матричного метода, где достаточно получить разложение матрицы методом Холецкого и перемножить его с вектором правых частей n -раз, где n – количество частот в сигнале [Гореявчев и др., 2024].

3.6 Определение вариаций сигнала прямой волны в условиях морской инженерной сейсморазведки

Поверхностно-согласованная коррекция амплитудных спектров выполнена на данных морской инженерной сейсморазведки, полученные в ходе полевых работ в акватории Белого моря совместно с МГУ (Рисунок 43) [Гореявчев, 2015; Гореявчев, Митрофанов, 2016а; Гореявчев, 2016б; 2017].

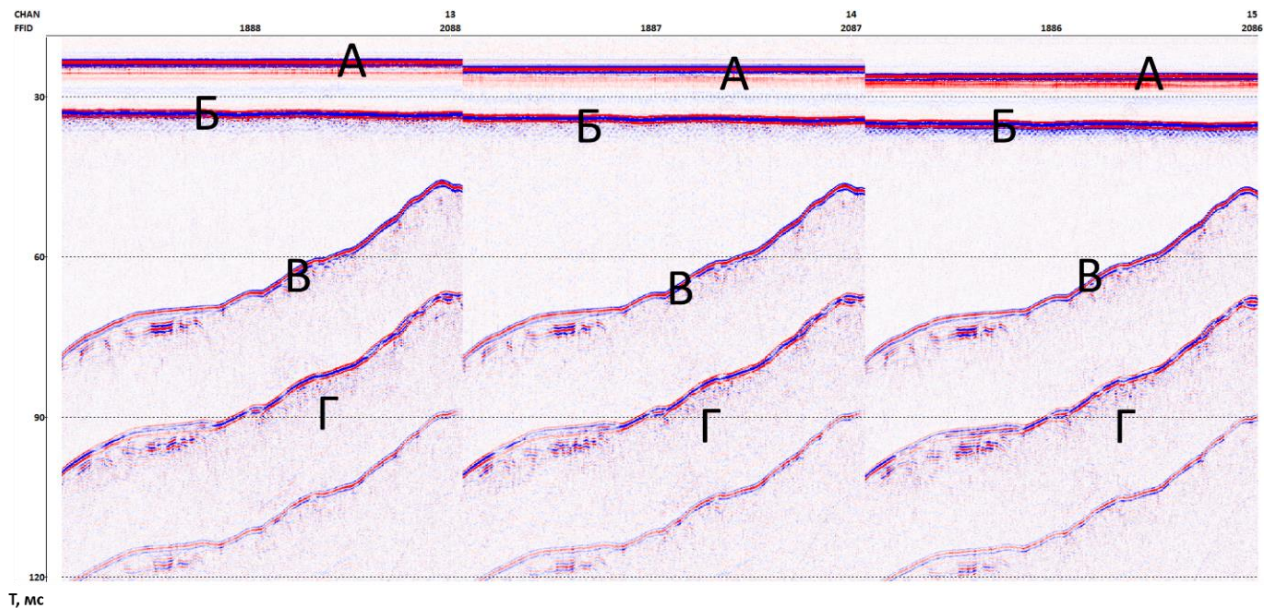


Рисунок 43 – Морские данные представлены в виде выборки по каналам (13, 14, 15) из системы наблюдений. Типы сейсмических волн обозначены буквами: А – прямая волна, Б – волна, отражённая от поверхности моря, В – волна, отражённая от морского дна, Г – область кратных волн разного происхождения.

В 2015 году на территории Белого моря проводились опытные сейсмические работы с использованием технологии заглубленной установки

(Рисунок 44). Основным преимуществом получения данных при помощи заглубленных установок, является существенное повышение соотношения сигнал/помеха за счет избавления от приповерхностных шумов (кильватерная струя, волнения и т.д.), меньшая зависимость от погоды, а также возможность изучения «чистого» импульса источника, в силу того, что на достаточных глубинах не происходит интерференция прямой волны и волны, отраженной от морской поверхности. Также с увеличением глубины происходит сужение импульса источника типа «Спаркер», что, в свою очередь, повышает разрешающую способность. Одной из методических особенностей является то, что заглубление системы источник – приемник, не должно превышать половины мощности воды в точке наблюдений. Это необходимо для того, чтобы волна, отраженная от морской поверхности, не интерферировала с волнами, отраженными от дна.

При проведении работ использовался электроискровой источник - «Спаркер» (Рисунок 45), принципиальная схема устройства описана в работе [Шалаева, 2010]. Центральная частота источника составляет 600 Гц, полоса частот полезного сигнала – от 200 до 3500 Гц, время между выстрелами 0.5 мс, длина импульса 3 мс.

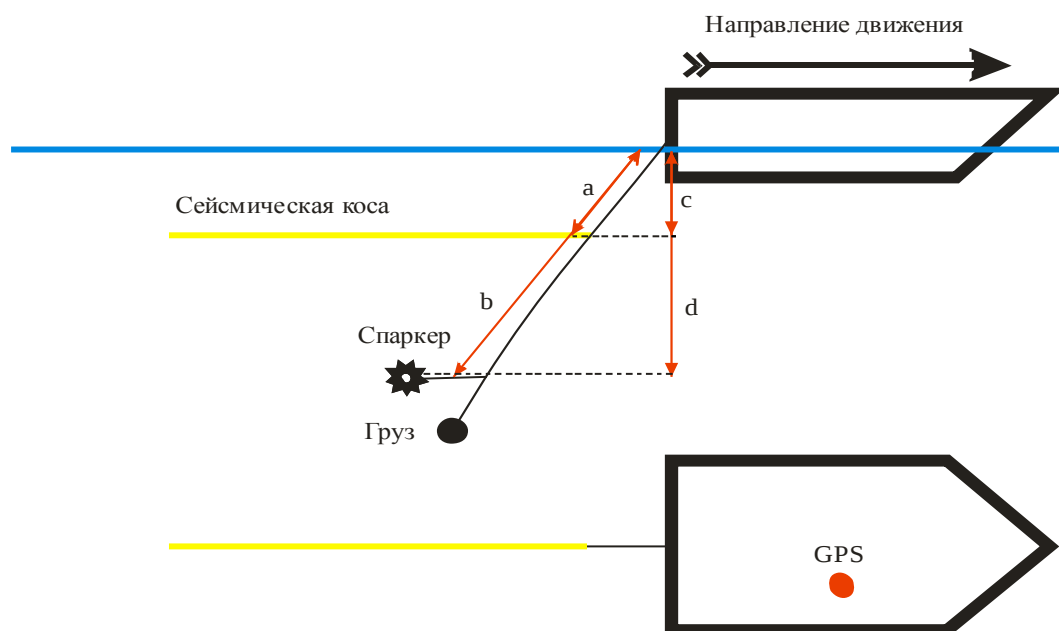


Рисунок 44 – Схема расстановки для наблюдений с заглубленной многоканальной косой.

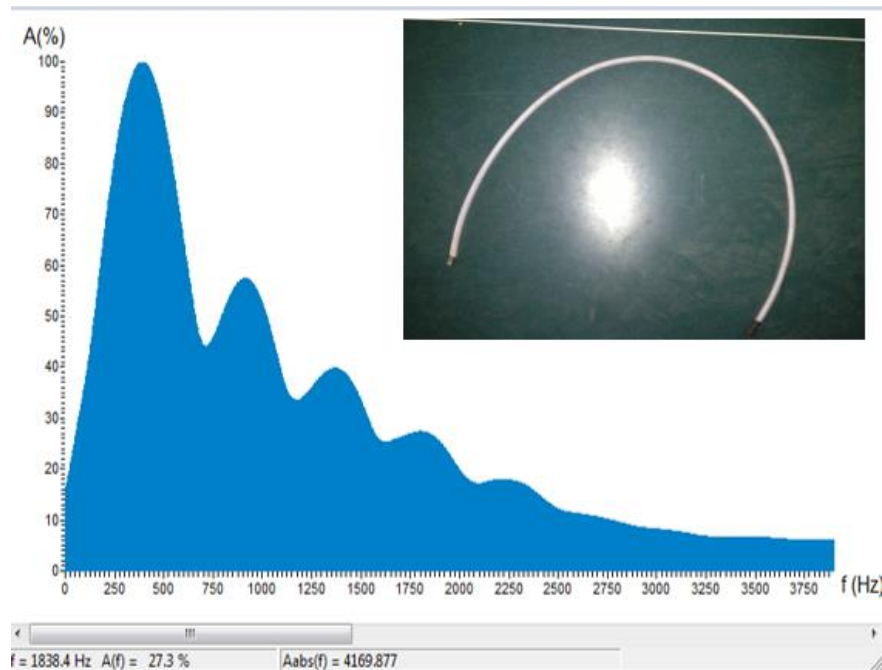


Рисунок 45 – Электроискровой источник «Спаркер» и его амплитудный спектр.

Источник «Спаркер» обладает глубиной порядка 500 м и вертикальной разрешающей способностью около 5 м.

В качестве регистрирующей аппаратуры была использована многоканальная приемная пьезокоса Spectra Geo MSS-16-3 (Рисунок 46).



Рисунок 46 – 16-канальная сейсмическая коса.

На рисунке 47 представлен фрагмент прямой волны, где цветом выделены пиковые значения фазы, относительно которых впоследствии выбирались окна для анализа. В морских условиях форма сейсмического сигнала прямой волны не должна существенно изменяться вдоль всего профиля. На отдельных трассах заметны слабые сигналы после основного импульса прямой волны. До отметки 12 миллисекунд также наблюдаются малоамплитудные колебания. Эти вариации формы сигнала, скорее всего, обусловлены особенностями отстрела источника или приёмника.

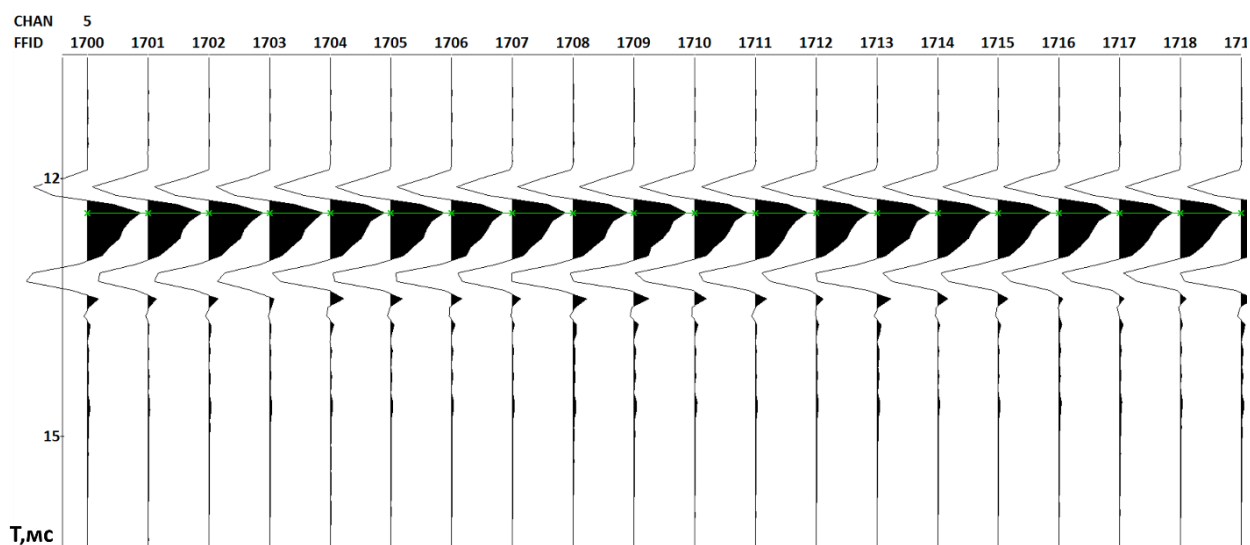


Рисунок 47 – Участок прямой волны. Зеленым цветом показана пикировка положительной фазы.

Для анализа амплитудных спектров было решено интервал прямой волны использовать длиной 7 мс (Рисунок 48).

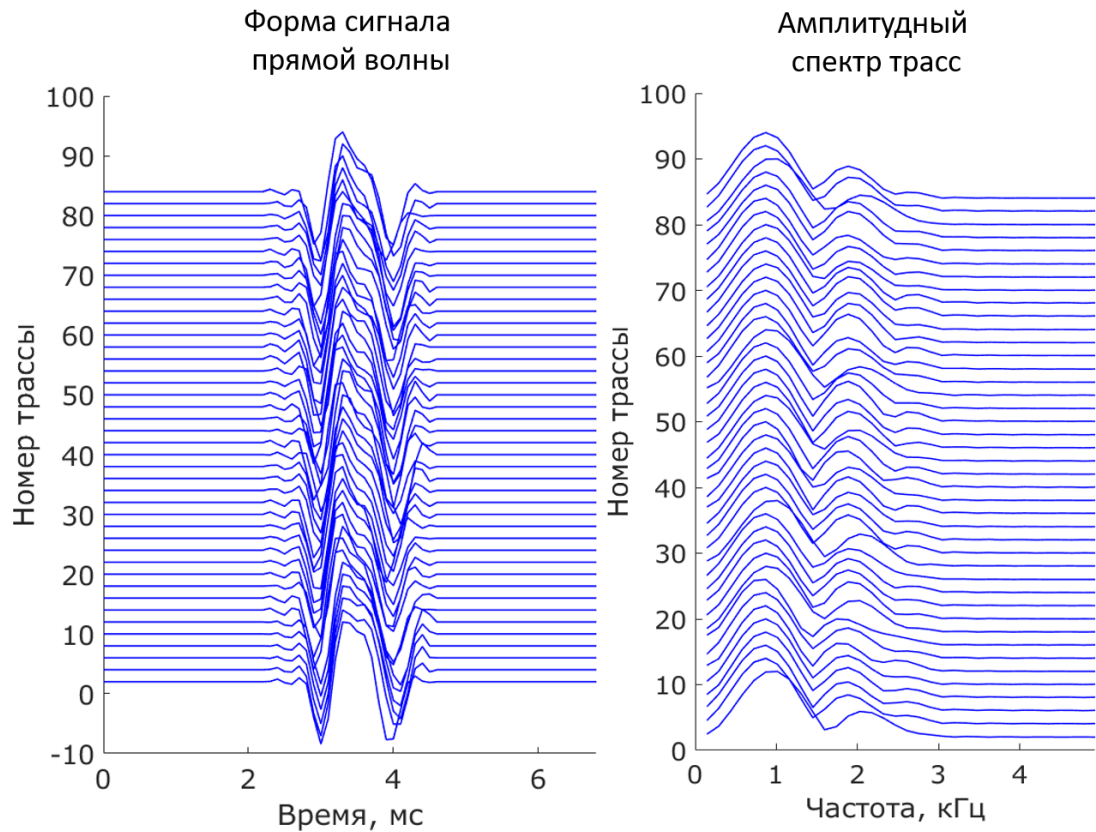


Рисунок 48 – Форма сигнала прямой волны на интервале 7 мс для разных трасс (левый рисунок) и их амплитудный спектр (рисунок справа).

Из рисунка 48 видно, что форма сигнала изменяется от канала к каналу при одной точке возбуждения. Амплитудные спектры были посчитаны путем дополнения временных интервалов нулями. Также сигналы были сглажены при помощи специального окна – окна Тьюки (Рисунок 49) [Harris, 1978].

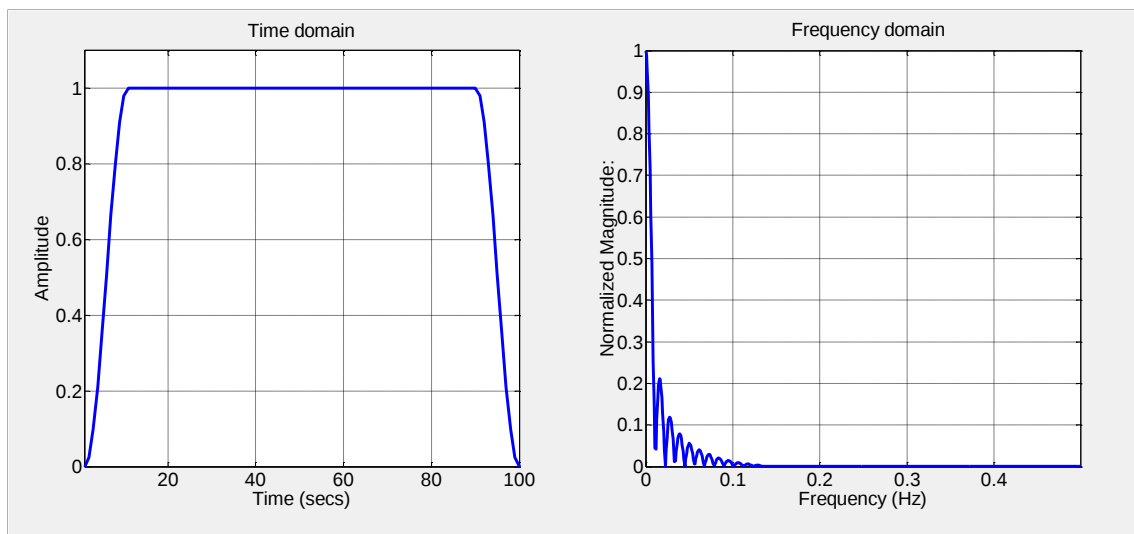


Рисунок 49 – Окно Тьюки и его амплитудная характеристика.

Оценка изменений в спектральных характеристиках выполняется на основе построения гистограмм амплитудных спектров на каждой из частот. В однородной среде, как в случае распространения прямой волны в морской толще, форма гистограммы должна быть близка к форме, описывающей нормальное распределение (кривая Гаусса).

По значению среднеквадратичного отклонения определяется количественная оценка изменений спектральных характеристик. Для количественной оценки построены гистограммы, каждая из которых включает значения амплитудных спектров, полученные вдоль всего профиля исследований.

Для примера рассматривается гистограмма, построенные на частоте 600 Гц (Рисунок 50) [Горяевчев и др., 2016в; 2016г].

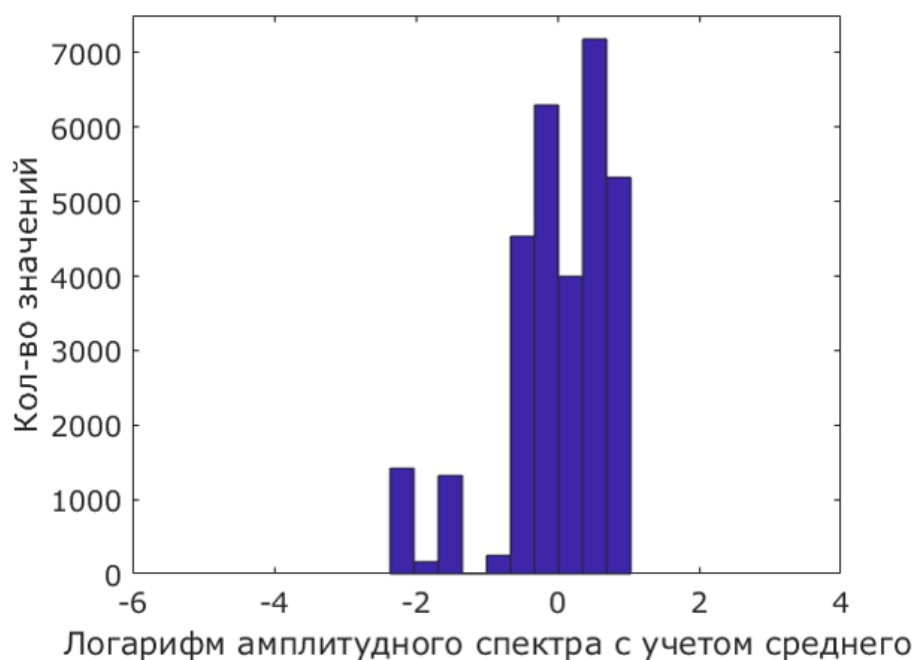


Рисунок 50 – Гистограмма, построенная по всем значениям амплитудного спектра на частоте 600 Гц.

Полученные вариации в форме сигнала прямой волны, а именно наличие нескольких мод и заметное отличие от нормального распределения, существенны – их необходимо корректировать.

Такая постановка задачи не является классическим представлением поверхностно-согласованной деконволюции, поскольку для корректировки

вариаций должны быть использованы только факторы (источник, приёмник, удаление). При этом основная форма сигнала должна остаться в данных. Тем не менее алгоритм получения факторов абсолютно идентичен алгоритму получения факторов в задаче деконволюции.

Корректировка формы сигнала выполнялась в рамках трехфакторной модели (источник – приёмник – ОЦТ). Линеаризация факторной модели выполнена на основе логарифмирования значений амплитудного спектра сигнала прямой волны. Факторная декомпозиция имела следующий вид (26):

$$\ln(S_{ij}(\omega)) = z_{ij}(\omega) = C(\omega) + \alpha_i(\omega) + \beta_j(\omega) + \lambda_{i-j}(\omega) + \zeta_{ij}(\omega), \quad (26)$$

где $\ln(S_{ij}(\omega))$ – логарифм амплитудного спектра сигнала прямой волны, i – координата источника, j – координата приёма, $C(\omega)$ – постоянная составляющая в форме сигнала, $\alpha_i(\omega)$ – фактор, связанный с координатой источника, $\beta_j(\omega)$ – фактор, связанный с координатой приёма, $\lambda_{i-j}(\omega)$ – фактор, связанный с удалением ПВ-ПП, $\zeta_{ij}(\omega)$ – случайная помеха, ω – фиксированная частота.

Результат оценки факторов представлен на рисунке 51. Факторы были получены для фиксированных частот, с учетом (вычетом) средней составляющей и нормировки на максимальное значение.

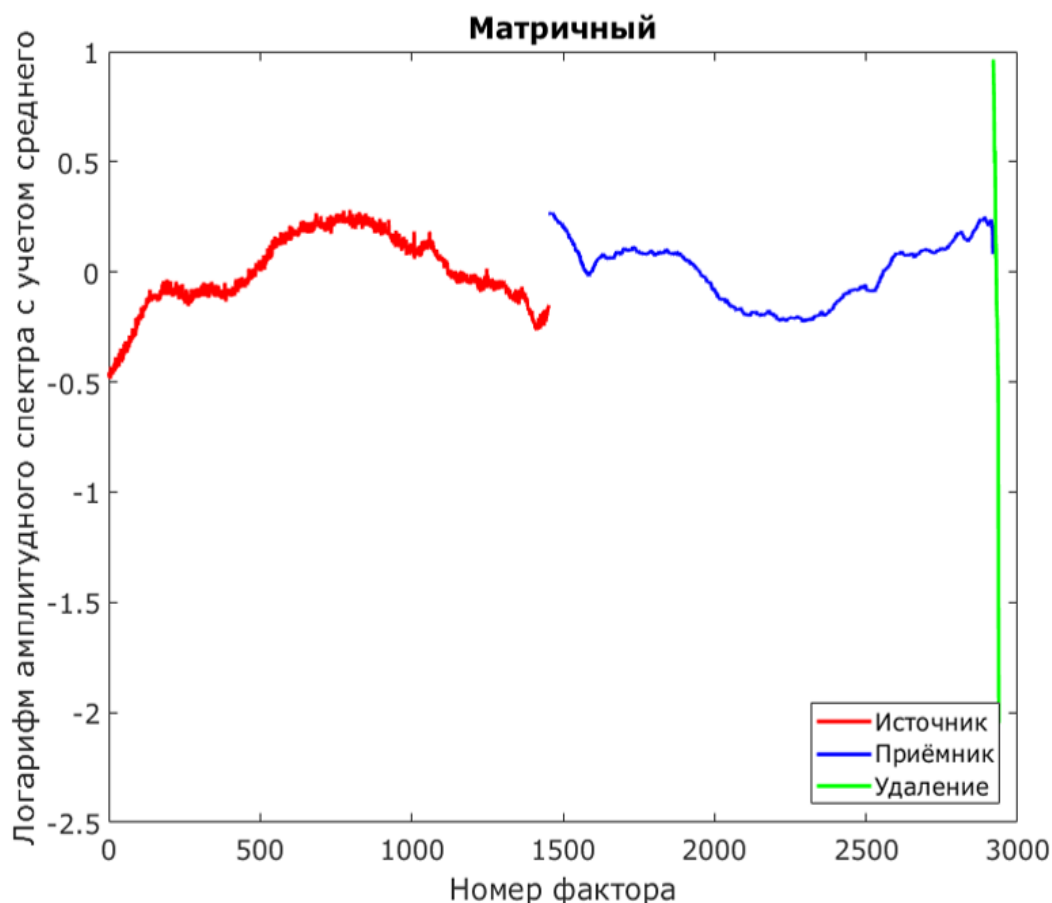


Рисунок 51 – Оценки факторов на центральной частоте 600 Гц, рассчитанные в рамках трехфакторной модели на основе логарифмов амплитудных спектров прямой волны. По вертикальной оси отложены значения нормированных логарифмов амплитудных спектров, по горизонтальной оси — номер фактора.

Оценка факторов проводилась двумя методами – итеративным и матричным с дополнениями. В качестве итеративного метода был использован метод BICGSTAB. Суммарное время расчета поправок на 121 частоте заняло ~24 секунды. В качестве прямого решателя было задействовано разложение Холецкого, в качестве дополнений было введено 2 константы (фактор источника и фактор удалений) и 1 линейная составляющая (фактор приёмника). Суммарное время расчета поправок составило ~2 секунды. Относительная ошибка между решениями по норме L2 составила $2.098e-05$.

При относительной схожести решений, время счета отличается практически в 12 раз, что подчеркивает вывод о том, что в задаче поверхностно-

согласованной коррекции амплитудных спектров (как и в задаче деконволюции) гораздо выгоднее использовать прямые решатели с дополнением. На рисунке 52 представлен результат корректировки формы сигнала прямой волны.

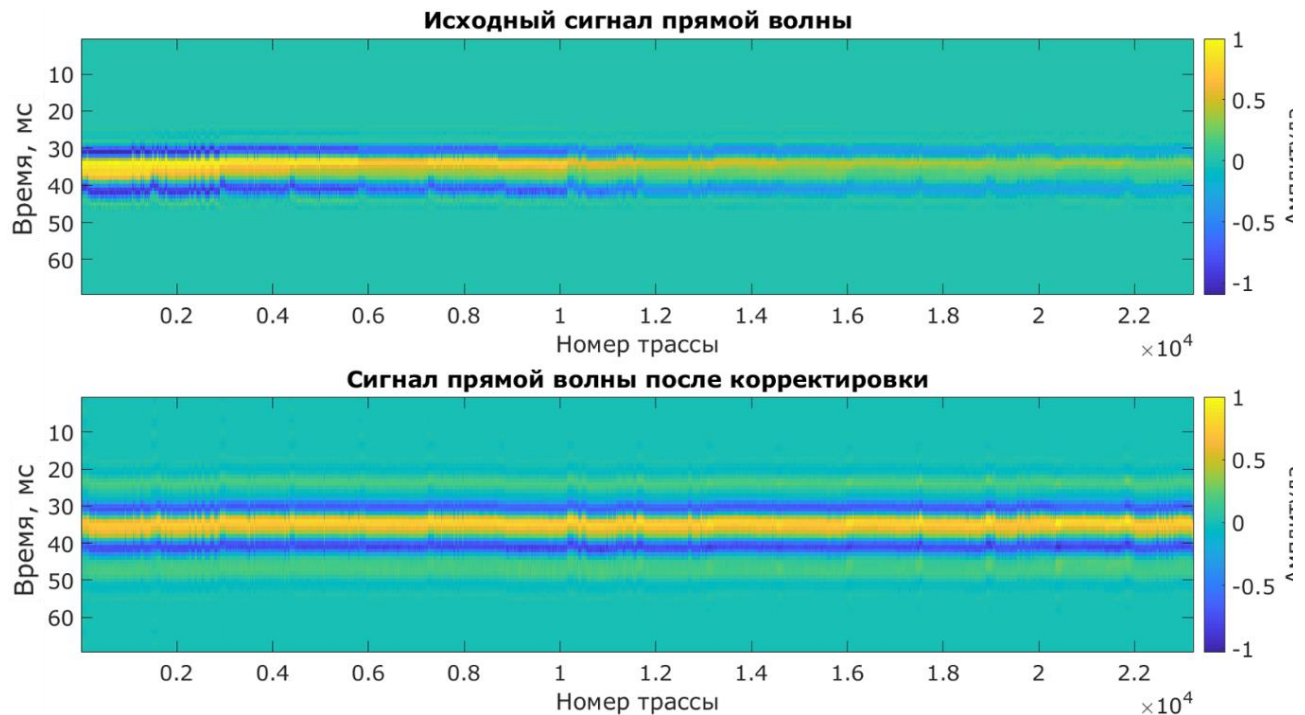


Рисунок 52 – Результат коррекции формы сигнала прямой волны. На верхнем рисунке представлена исходная форма сигнала. На нижнем рисунке показана форма сигнала прямой волны после корректировки (компенсация трех факторов: источник, приемник и удаление).

Из рисунка видно, что произошла стабилизация формы сигнала прямой волны. Трассы выглядят идентично друг другу, также следует отметить, что амплитуда вдоль профиля стабильна.

При этом по краям основной части сигнала возникли дополнительные осцилляции, вероятно, это связано с неучетом фазовой части спектра. Потрассное сравнение результата «до» и «после» корректировки представлено на рисунке 53.

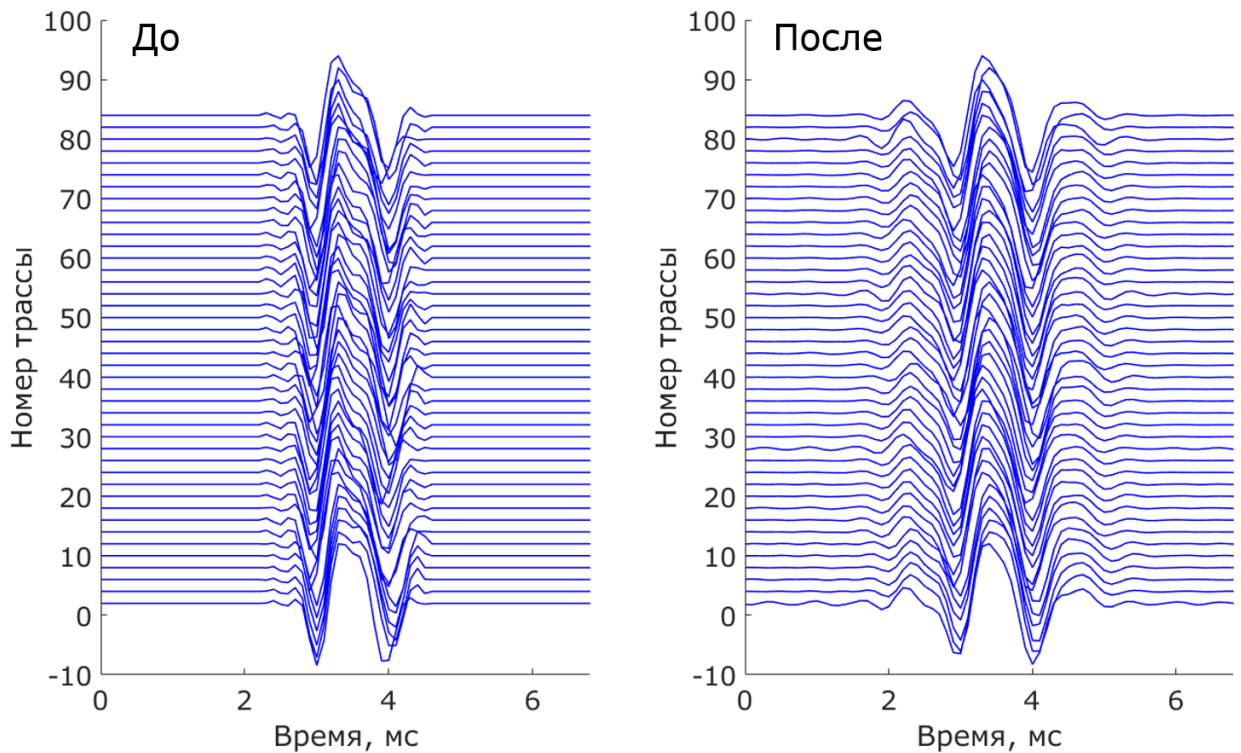


Рисунок 53 – Результат корректировки формы сигнала прямой волны, потрассное представление. Левый рисунок – исходная форма сигнала.

Правый рисунок – форма сигнала прямой волны после корректировки (компенсация трех факторов – источник, приемник, удаление).

Результат декомпозиции позволил произвести оценку амплитудных спектров шумовой составляющей. Оценка производилась путём вычитания полученных факторов из исходных данных. Для сравнения шумовой составляющей с исходными данными было решено построить гистограммы по значениям амплитудных спектров. Гистограммы были получены в рамках трехфакторной модели для фиксированных частот, отобранных в целевой полосе частот. Сравнение логарифмов амплитудных спектров прямой волны представлено на рисунке 54.

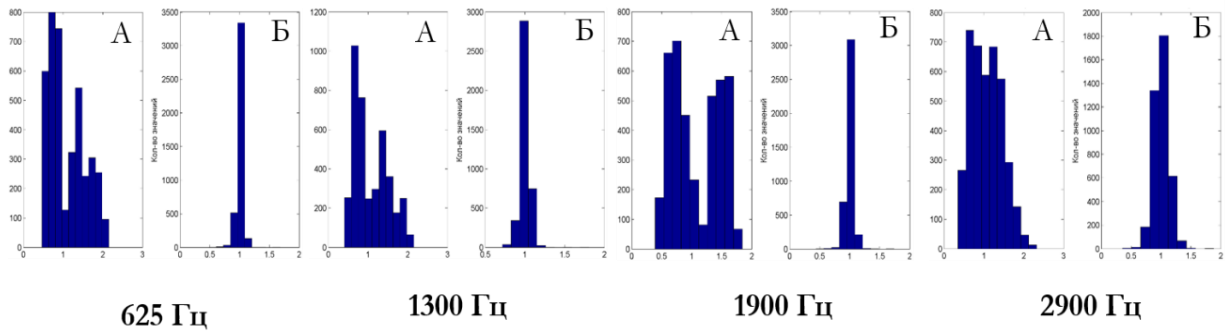


Рисунок 54 – Гистограммы (А – исходные амплитудные спектры) и (Б – шумовая составляющая), вертикальная ось гистограмм соответствует количеству значений, горизонтальная – нормированным значениям логарифмов амплитудных спектров. Горизонтальная ось характеризует вариативность амплитудных спектров.

Как видно из рисунка, форма гистограмм шумовой составляющей (Б) унимодальна и близка к нормальному распределению, в отличие от исходных гистограмм (А). Коррекция амплитудных спектров на основе факторного разложения позволила снизить степень вариативности динамических характеристик сигнала прямой волны. Основной вклад в вариативность вносят факторные составляющие, поскольку форма гистограммы шума соответствует нормальному распределению. Стоит заметить, что подобный результат получен на всех частотах для формы прямой волны. Дополнительно получены оценки вариативности амплитудных спектров в рамках четырехфакторной модели (с включением фактора ОЦТ) (Рисунок 55).

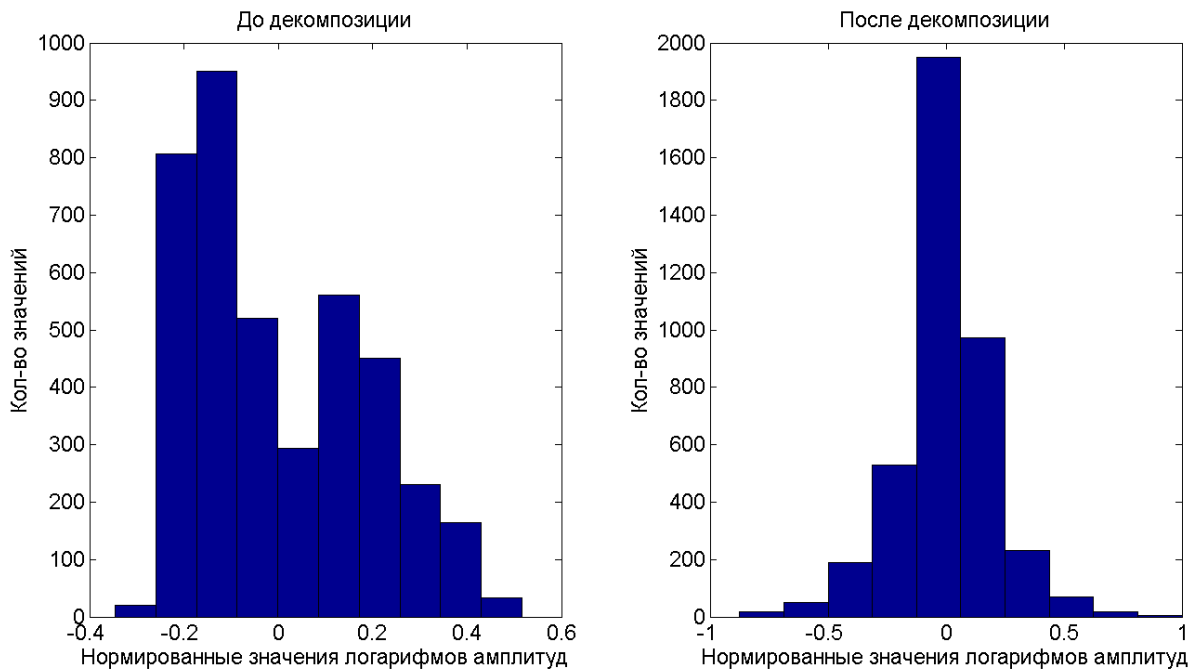


Рисунок 55 – Гистограммы (А – исходные амплитудные спектры) и (Б – шумовая составляющая), вертикальная ось гистограмм соответствует количеству значений, горизонтальная – нормированным значениям логарифмов амплитудных спектров. Горизонтальная ось характеризует вариативность амплитудных спектров.

Гистограммы (А и Б) построены для частоты 1300 Гц, из них удалена постоянная составляющая (среднее значение). Гистограмма Б имеет унимодальную форму и близка к нормальному распределению. Гистограммы подтверждают тот же вывод для четырехфакторной модели: существенные изменения обусловлены факторами, а не шумовой компонентой [Goreyavchev et al., 2020].

3.7 Апробация алгоритма на полевых данных – поверхностно-согласованная деконволюция на площадных данных

Поверхностно-согласованная деконволюция с использованием разработанного алгоритма на площадных наземных данных (разложение на два фактора источник-приёмник). Результаты деконволюции для 3 сейсмограмм приведены на рисунке 56 и сравниваются с результатами производственного

программного обеспечения Geovation (в основе итерационный метод Гаусса-Зейделя).

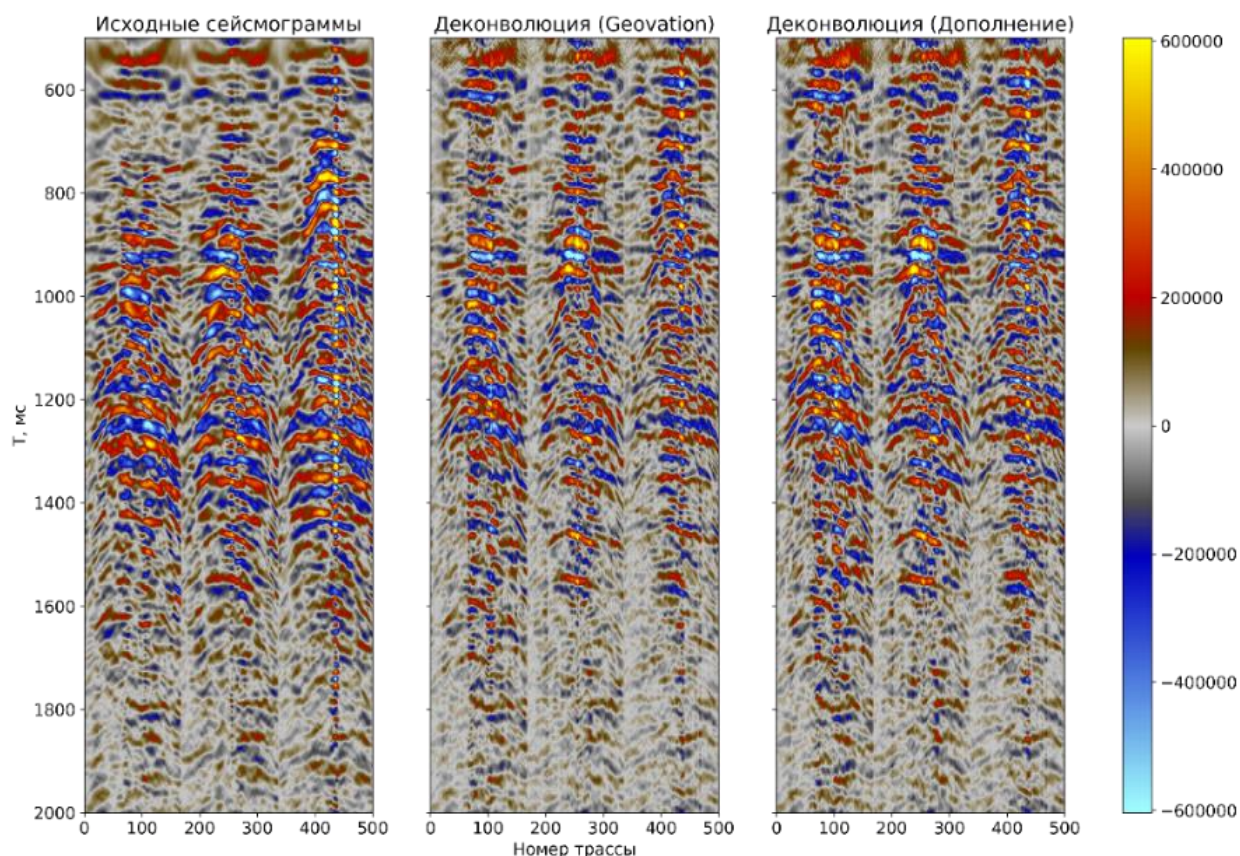


Рисунок 56 – Фрагмент сейсмограмм до и после поверхностно-согласованной деконволюции (левый рисунок – исходные сейсмограммы, средний – дековолюция в пакете Geovation, правый – деконволюция алгоритмом дополнений.

В результате сравнительного анализа показано, что результаты деконволюции, полученные с помощью разработанного алгоритма, практически совпадают с результатами промышленного ПО. Незначительные различия в интенсивности сигнала обусловлены разными подходами к заданию уровня белого шума в алгоритмах. На рисунке 57 приведены амплитудные спектры для всего тестового набора данных, демонстрирующие сходство частотных характеристик после обработки обоими алгоритмами. Этот результат подтверждает, что разработанный алгоритм корректно восстанавливает полезный сигнал без существенных искажений.

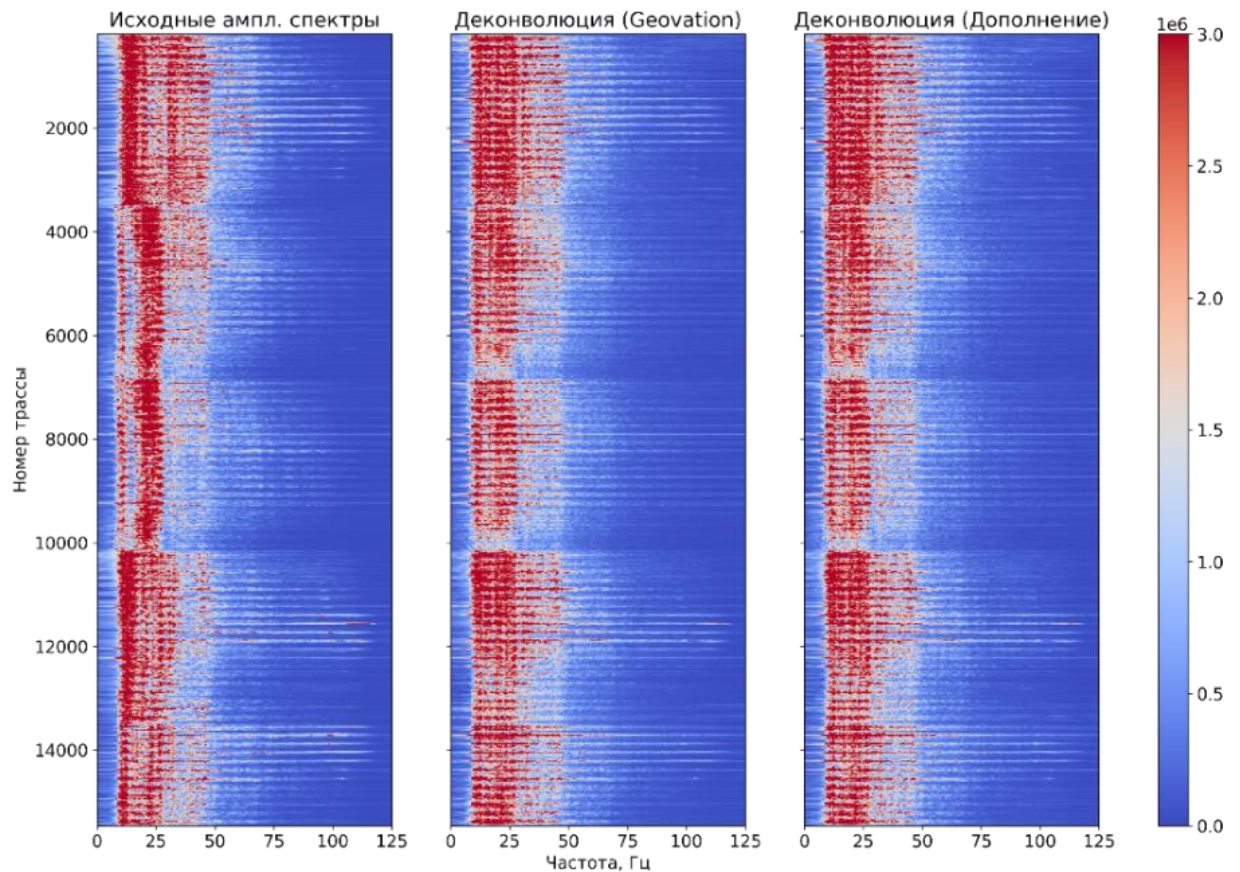


Рисунок 57 – Амплитудные спектры по всему набору данных до и после поверхностно-согласованной деконволюции (левый рисунок – исходные спектры, средний – спектры после дековолюции в пакете Geovation, правый – спектры после дековолюции алгоритмом дополнений).

Проведённые тесты позволяют сделать вывод о том, что разработанный алгоритм поверхностно-согласованной деконволюции обеспечивает сопоставимое качество с решением из пакета обработки Geovation, что подтверждается как визуальным сравнением сейсмограмм, так и сравнительным анализом спектральных характеристик. Учитывая вычислительную эффективность разработанного алгоритма, показанную в разделе 3.5, он рекомендуется для использования в обработке площадных сейсмических данных, особенно в случаях, когда требуется оптимизация вычислительных ресурсов без потери качества результатов. [Гореявчев и др., 2024].

3.8 Апробация алгоритма на полевых данных – поверхностно-согласованная коррекция амплитуд на площадных данных

Поверхностно-согласованная коррекция амплитуд представляет собой важнейший этап обработки сейсмических данных, направленный на устранение искажений, вызванных неоднородностями верхней части разреза. Эти искажения проявляются в виде зон аномальных амплитуд - как пониженных, связанных с поглощающими свойствами пород, так и повышенных, обусловленных особенностями возбуждения и регистрации сигнала. Компенсация таких вариаций и выравнивание амплитудного баланса по всему объёму данных критически важны для последующей интерпретации и построения достоверных сейсмических изображений.

Основное влияние на амплитудные искажения оказывают два ключевых фактора: источник сигнала, где вариации энергии возбуждения зависят от условий в точках взрыва или вибрации, и приёмник, где различия в чувствительности оборудования и условиях регистрации вносят дополнительные искажения. Именно учёт этих факторов позволяет считать данные поверхностно-согласованными. При работе с крупными 3D-массивами данных, включающими десятки миллионов трасс, наиболее эффективным является итерационный метод решения систем линейных уравнений, который обеспечивает нахождение факторов источника и приёмника с высокой точностью при разумных вычислительных затратах.

Практическая апробация разработанного алгоритма проводилась на реальных данных, включавших 71 миллион сейсмических наблюдений и около 100 тысяч неизвестных параметров. В результате применения алгоритма были получены значения факторов источника и приёмника, которые были сопоставлены с факторами, полученными в промышленном пакете обработки Geovation (Рисунки 58).

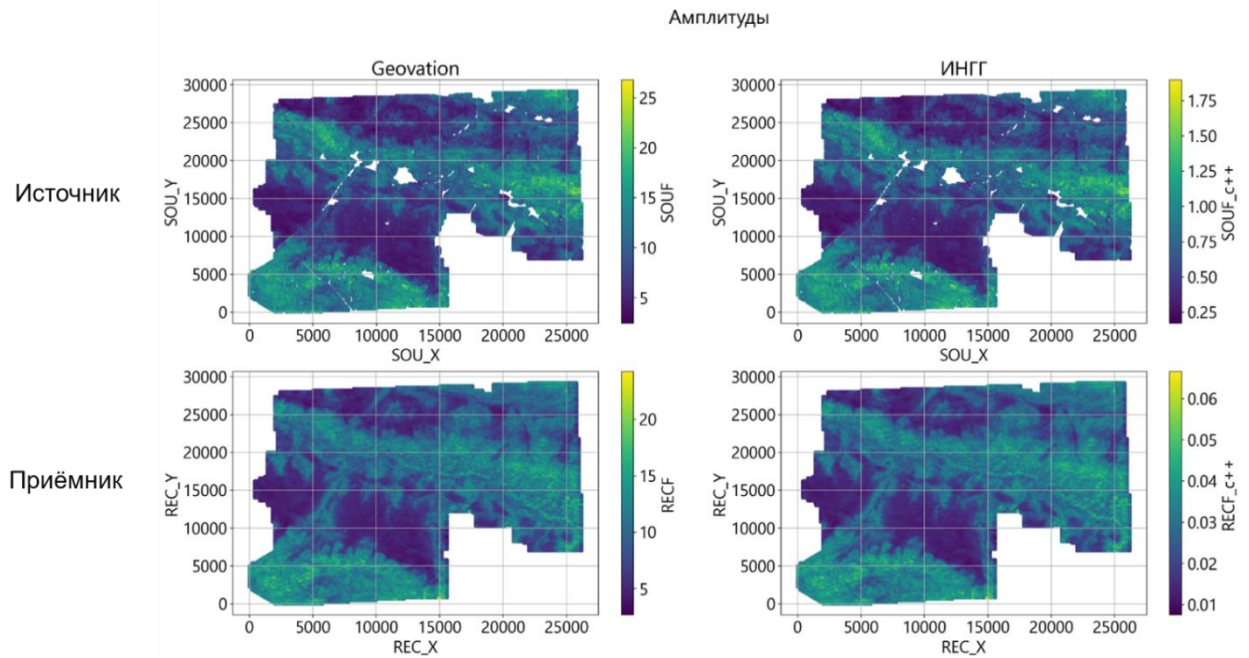


Рисунок 58 – Сравнение факторов, полученных в промышленном пакете обработки Geovation (левый столбец рисунков) и факторов, полученных алгоритмом поверхностно-согласованной компенсации амплитуд на основе разработанного алгоритма. Единицы измерений по осям X, Y – метры.

Более детальный количественный анализ выявил некоторые различия в численных значениях факторов не превышающие 3-4%, что подтверждается построенными картами отклонений между результатами, полученными разными алгоритмами (Рисунок 59).

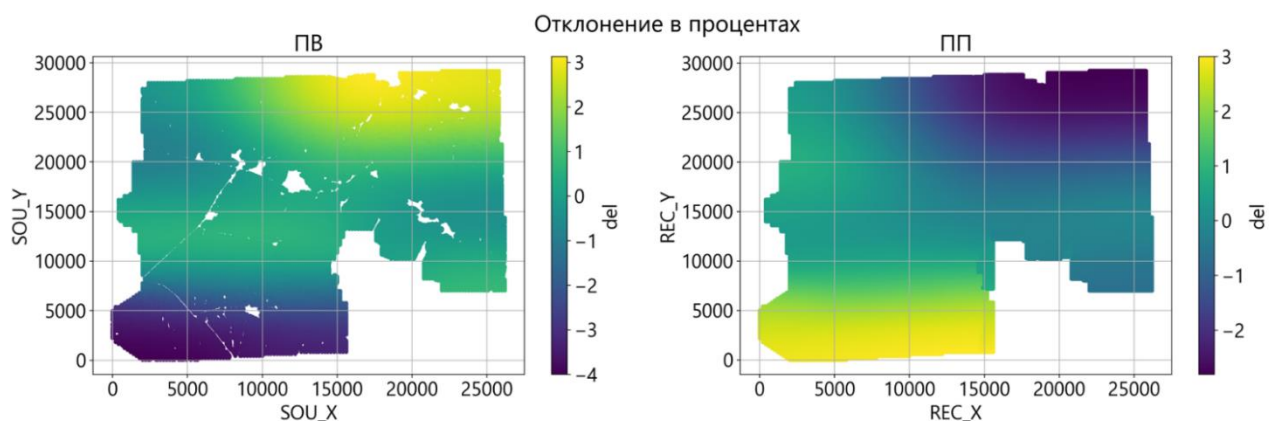


Рисунок 59 – Отклонение между полученными решениями в процентах. Левый рисунок – карта отклонений по источникам, правый рисунок – карта отклонений по приёмникам. Отклонение решений составило не больше 3%. Единицы измерений по осям X, Y – метры.

Сравнение с результатами из пакета Geovation показало, что визуально результаты коррекции амплитуд практически неразличимы – как на разрезах (Рисунок 60), где особенно хорошо видна компенсация аномалий в зонах несогласий, так и на картах RMS-амплитуд в пределах временного окна 500-1100 мс (Рисунок 61).

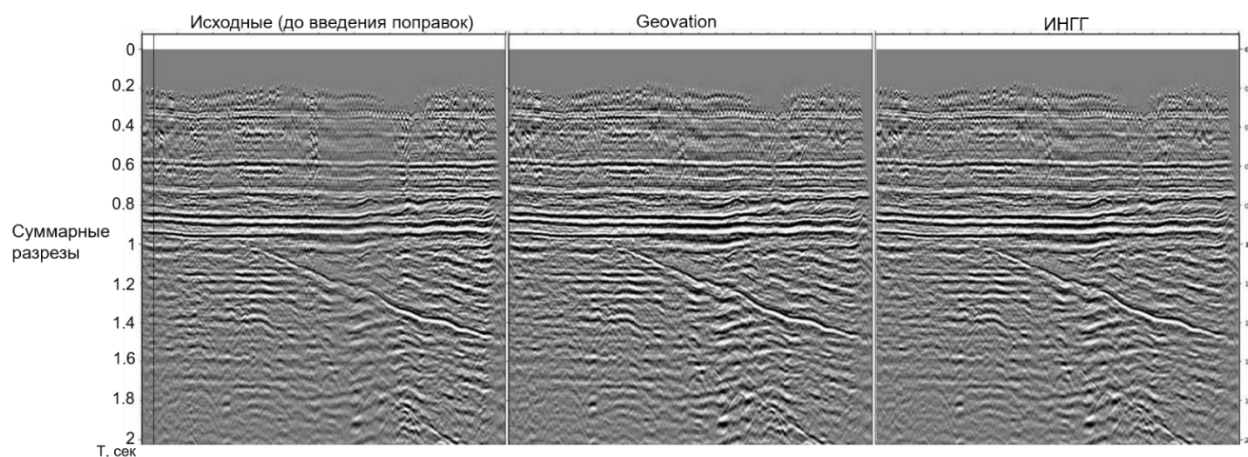


Рисунок 60 – Сравнение суммарных временных разрезов: левый разрез – до введения поправок, средний разрез – с включением поправок, определенных в производственном пакете Geovation, правый разрез – с включением поправок, определенных разработанным алгоритмом.

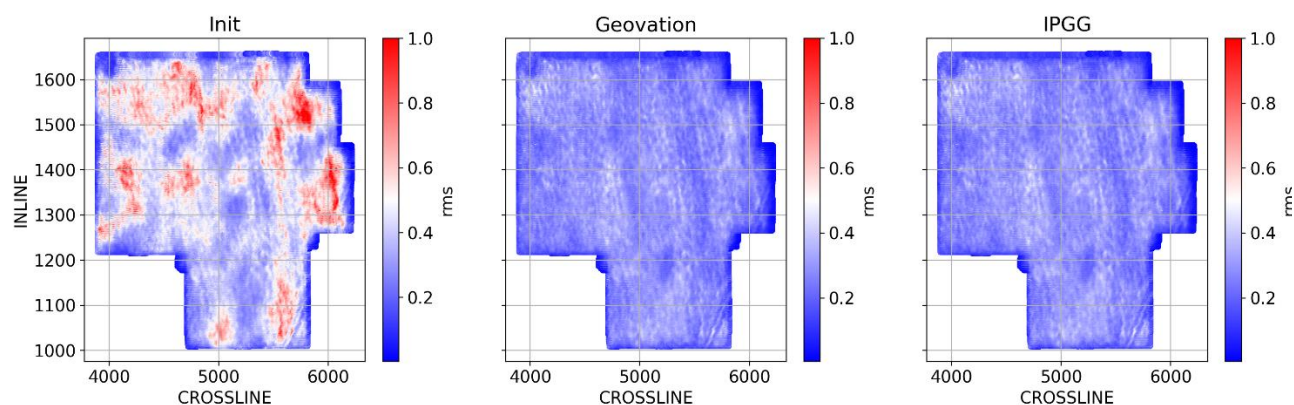


Рисунок 61 – Сравнение карты RMS амплитуд, построенных в окне 500-1100 мс по суммарному кубу: левая карта – до введения поправок, средняя карта – с включением поправок, определенных в производственном пакете Geovation, правая карта – с включением поправок, определенных разработанным алгоритмом.

Совпадение результатов также подтверждается практически полным совпадением гистограмм распределения амплитуд до и после коррекции (Рисунок 62).

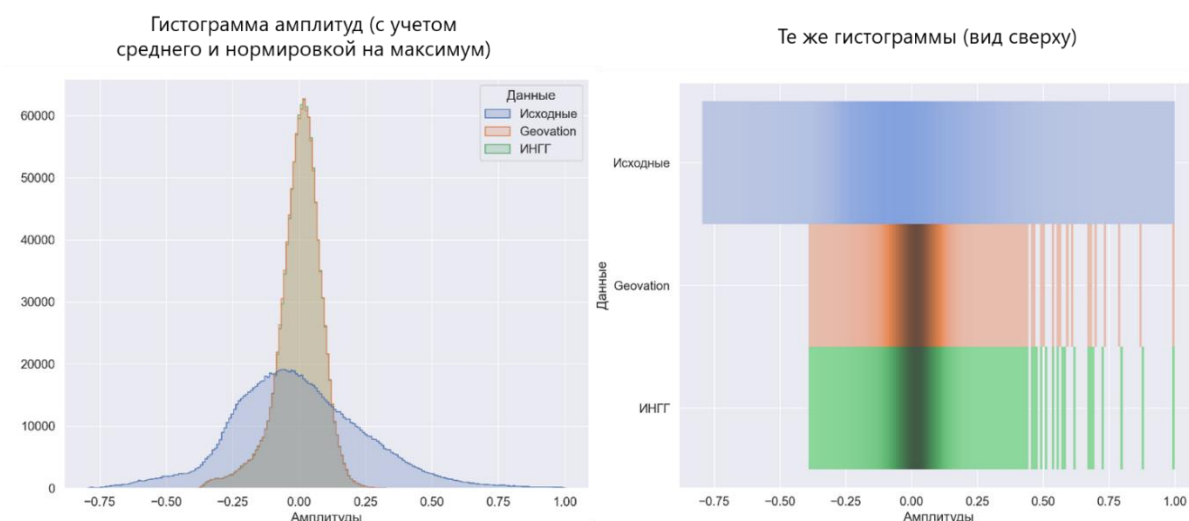


Рисунок 62 – Сравнение гистограмм амплитуд, построенных в окне 500-1100 мс по данным до суммирования (левый рисунок): синяя гистограмма – исходные амплитуды, до введения поправок, коричневая гистограмма – амплитуды с включением поправок, определенных в производственном пакете Geovation, зеленая карта – амплитуды с включением поправок, определенных при помощи разработанного алгоритма. Правый рисунок – те же гистограммы, вид сверху.

Апробация работы алгоритма на основе итеративного метода была проведена не только для базовой двухфакторной модели, но и для более сложного варианта факторного разложения в рамках 5-факторной модели, учитывающей следующие параметры: источник, приемник, ОГТ, удаления и азимут. Такой комплексный подход позволяет более точно учитывать различные аспекты распространения сейсмических волн в разных геологических условиях.

Результаты сопоставления факторов представлены на серии рисунков (63-65), демонстрирующих высокую степень соответствия между данными, полученными промышленным пакетом обработки Geovation и разработанным алгоритмом.

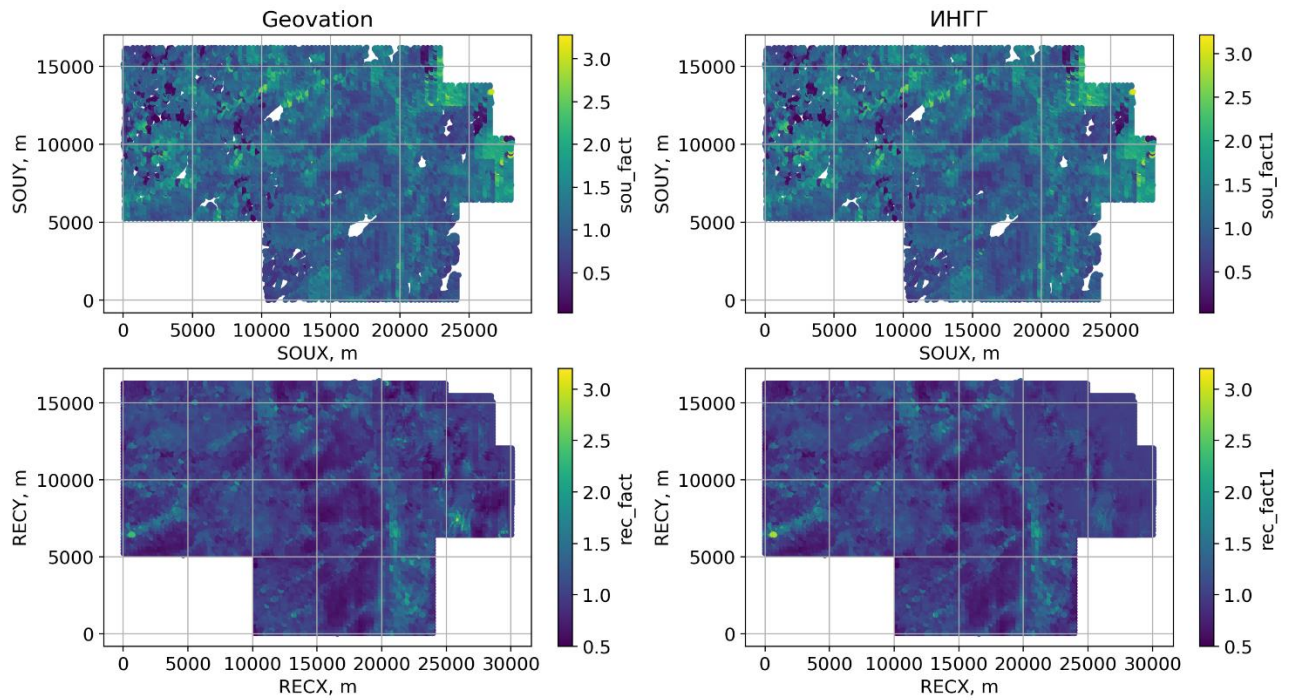


Рисунок 63 – Сравнение факторов (источники и приёмники), полученных в промышленном пакете обработки Geovation (левый столбец рисунков) и полученных алгоритмом поверхностно-согласованной компенсации амплитуд на основе разработанного алгоритма. Единицы измерений по осям X,Y – метры.

На рисунке 63 показано сравнение факторов источников и приемников, полученных разработанным алгоритмом в пакете Geovation. На рисунках видно, что пространственное распределение и относительные значения факторов демонстрируют высокую степень корреляции, что подтверждает правильность математического аппарата разработанного алгоритма. При этом в оценках фактора приёмника наблюдаются небольшие отличия.

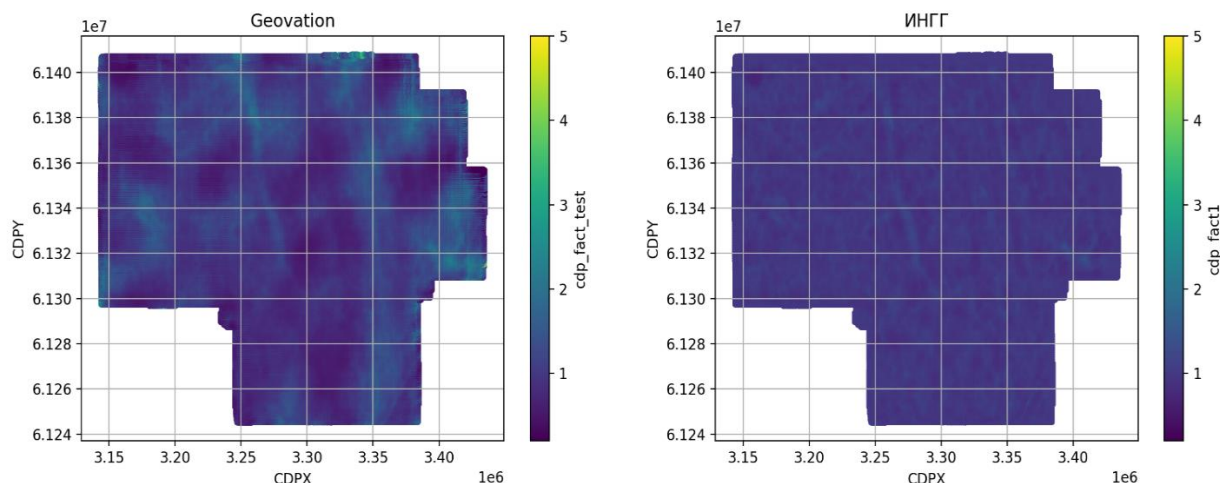


Рисунок 64 – Сравнение факторов (ОГТ), полученных в промышленном пакете обработки Geovation (левый столбец рисунков) и полученных алгоритмом поверхностно-согласованной компенсации амплитуд на основе разработанного алгоритма. Единицы измерений по осям X,Y – метры.

На рисунок 64 представлено сравнение факторов ОГТ (общая точка глубины). Анализ представленных данных показывает, что в оценках фактора ОГТ наблюдаются небольшие отличия, аналогичные тем, что наблюдались в факторе приёмника. При этом различия в оценках факторов приёмника и факторы ОГТ могут объясняться меньшей статистикой, т.е. меньше кратностью на каждый фактор, в следствие разные итерационные решатели могут по-разному сходиться, в отличие от других факторов (источник, удаление, азимут), где кратность гораздо выше. Тем не менее окончательная оценка сравнения должна проводиться по общему набору поправок для каждой трассы, т.е. когда все факторы будут объединены в одну поправку.

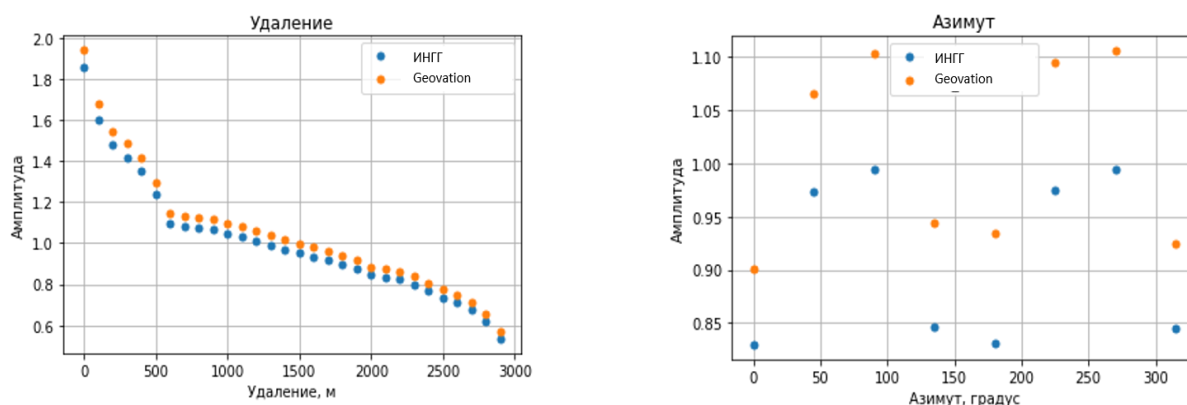


Рисунок 65 – Сравнение факторов (удаления) – левый рисунок, сравнение факторов (азимуты) – правый рисунок, полученных в промышленном пакете обработки Geovation (оранжевые точки) и полученных алгоритмом поверхностно-согласованной компенсации амплитуд на основе разработанного алгоритма (синие точки). Единицы измерений по осям X,Y – метры.

На рисунке 65 представляет комплексное сравнение двух последних факторов модели: удалений (левый график) и азимутов (правый график). На графике удалений хорошо видно, что оба решения схожи. Анализ факторов за азимут (правый график) показывает, что значения факторов отличаются на константу.

Небольшие отклонения в значениях факторов, в сравнение с значениями из промышленного пакета, не играет большой роли, поскольку разница между итоговыми поправками для конкретной трассы при перемножении факторов стремится к нулю. Сопоставление всех пяти факторов демонстрирует, что разработанный алгоритм обеспечивает комплексную и сбалансированную коррекцию амплитуд, полностью соответствующую по качеству промышленному решению.

Выводы

В заключении можно сказать, что разработанный алгоритм (поверхностно-согласованной компенсации сейсмических характеристик на основе прямого решения системы линейных уравнений с использованием дополнений) оптимально подходит для решения задач определения длиннопериодных вариаций (вариации, превышающие 1.5 длины расстановки) в случае профильных данных. Решение, также может быть получено с помощью итеративного метода, но либо при увеличении длины расстановки, либо закратно большее число итераций. Связность наблюдений играет большую роль в случае получения решения при помощи итерационных методов.

В случае площадных систем наблюдений проблема определения длиннопериодных вариаций отходит на второй план, поскольку наблюдения в расстановке на площади геометрически более связаны, а значит для решения задач оценки остаточных временных поправок и вариаций амплитуд эффективнее использовать итерационные методы.

Иначе обстоит дело с поверхностно-согласованной деконволюцией, с использованием итеративных решателей: требуется гораздо больше времени (из-за многократных независимых запусков решателя, даже с использованием предобуславливателя) для достижения точности, сравнимой с той, которую обеспечивает матричный метод. Проблема становится еще более выраженной при увеличении числа наблюдений и числа оцениваемых 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 объёма 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 объёмов 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 объём требуемой априорной информации.

Преимуществом является также его способность эффективно работать с большими объёмами сейсмических данных, что особенно важно в современных условиях, когда объёмы сейсмической информации постоянно растут. Введение априорной информации в алгоритме повышает точность расчётов 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.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВСП –	вертикальное сейсмическое профилирование
ВЧР –	верхняя часть разреза
МОВ –	метод отраженный волн
МСК –	микросейсмокаротаж
ОГТ –	общая глубинная точка
ОСТ –	общая средняя точка
ОЦТ –	общая центральная точка
ПВ –	пункт возбуждения
ПП –	пункт приёма
СЛАУ –	система линейных алгебраических уравнений
AVAZ –	изменение амплитуды отражения в зависимости от азимута
AVO –	изменение амплитуды отражения в зависимости от удаления
BICGSTAB –	стабилизированный метод бисопряжённых градиентов
BSD –	программная лицензия университета Беркли
LSQR –	метод наименьших квадратов с использованием QR-разложения матрицы
SVD –	сингулярное разложение

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аки К. Количественная сейсмология: Теория и методы Т. 1 / К.Аки, П.Ричардс. – М.: Мир. – 1983. – 520 с.
2. Беклемишев Д.В. Дополнительные главы линейной алгебры / Д.В. Беклемишев – М.: Наука. – 1983. – 335 с.
3. Глоговский В.М., Хачатрян А. Р. Коррекция статических поправок в сейсморазведке МОГТ на нефть и газ / В.М. Глоговский, А.Р. Хачатрян // М.: ВНИИОЭНГ. – 1986. – 56 с.
4. Гольдин С.В. Восстановление формы сигнала при наличии поверхностных неоднородностей / С.В. Гольдин, Г.М. Митрофанов // Сейсмические методы поиска и разведки полезных ископаемых. – Киев: Знание. – 1973. – С. 6-8.
5. Гольдин С.В. Спектрально-статистический метод учета поверхностных неоднородностей в системах многократного прослеживания отраженных волн / С.В. Гольдин, Г.М. Митрофанов // Геология и геофизика. – 1975. – Т. 2. – С. 102.
6. Гольдин С.В. К теории спектрально-статистического метода обработки сейсмограмм / С.В.Гольдин // Геология и геофизика. – 1976. – № 1. – С. 138-149.
7. **Горевачев Н.А.** Анализ спектральных характеристик сейсмических сигналов и их связи со свойствами среды // Материалы 53-й Международной научной студенческой конференции МНСК-2015: Геология (Новосибирск, 11-17 апреля 2015 г.). – 2015. – С. 37-37.
8. **Горевачев Н.А.** Исследование систем линейных уравнений, возникающих при коррекции формы сейсмического сигнала [Электронный ресурс] / Н.А. Горевачев, Г.М. Митрофанов // Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач: Восьмая

международной молодежной научной школы-конференции (Новосибирск, 1-7 сентября 2016 г.). – 2016а. – С. 43-43.

9. **Гореявчев Н.А.** Учет изменения формы сейсмического сигнала при морских исследованиях // Материалы 54-й международной научной студенческой конференции МНСК-2016 (Новосибирск, 16-20 апреля 2016 г.): Геология. – 2016б. – С. 37-37.

10. **Гореявчев Н.А.** Декомпозиция формы сейсмического сигнала, устраняющая неоднородность условий возбуждения и приема // Материалы 55-й Международной научной студенческой конференции МНСК-2017: Геология (Новосибирск, 16-20 апреля 2017 г.). – 2017. – С. 41-41.

11. **Гореявчев Н.А.** Оценка изменения динамических характеристик сигналов при морских сейсмических исследованиях / Н.А. Гореявчев, Г.М. Митрофанов // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2018а. – Т. 3. – С. 50-58.

12. **Гореявчев Н.А.** Влияние различных систем сейсмических наблюдений на оценку остаточных статических поправок // Науки о Земле. Современное состояние (Геологический полигон "Шира", Республика Хакасия, 30 июля-05 августа 2018). – 2018. – С. 19-21.

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

14. **Гореявчев Н.А.** Введение псевдоаприорной информации в алгоритм поверхностно-согласованной деконволюции для площадных систем наблюдений / Н.А. Гореявчев, 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.

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

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

17. Гурвич И.И. О количественном аппарате динамических измерений в сейсморазведке / И.И. Гурвич, А.К. Яновский // Физика Земли. – 1971. – № 4. – С. 41-47.

18. Гурвич И.И. Опыт применения сейсмических ансамблей для определения свойств областей очага, приема и отражения по данным МОВ / И.И. Гурвич, Чыонг Минь // Изв. вузов., Геология и разведка. – 1971. – № 7. – С. 99-104.

19. Гурвич И.И. Сейсмическая разведка / И.И. Гурвич, Г.Н. Боганик – М.: Недра. – 1980. – 551 с.

20. Давлетханов Р.Т. Учёт остаточных высокочастотных статических поправок в данных, соответствующих наблюдениям на неплоской линии приведения // Сейсмические технологии-2014: сб. докл. науч.-практ. конф. (Москва, 21–23 апр., 2014 г.). – 2014. – Т. 2014.

21. Давлетханов Р.Т. Учёт влияния ВЧР на основе поверхностно-согласованной параметризации годографа отражённой волны / Р.Т. Давлетханов, О.А. Силаенков // Технологии сейсморазведки. – 2016. – Т. 13. – № 3. – С. 102-113.

22. Давлетханов Р. Т. Коррекция сейсмических записей за влияние верхней части разреза с сохранением кинематики отражённых волн, соответствующих пластовой модели среды: диссертация ... кандидата

физико-математических наук: 25.00.10 / Давлетханов Ришат Талгатович. – Москва, 2017. – 177 с.

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

24. Козырев В.С. Определение и коррекция статических поправок в методе многократного профилирования при наличии протяженных неоднородностей / В.С. Козырев, В.К. Королев // Обзор ВИЭМС: Региональная разведочная и промысловая геофизика. М.: 1979. – С.66-70.

25. Кушнарев Р.С. Тестирование алгоритма поверхностно-согласованной компенсации сейсмических амплитуд / Р.С. Кушнарев, **Н.А. Горевячев**, Г.М. Митрофанов // Трофимуковские чтения - 2021: Материалы Всероссийской молодежной научной конференции с участием иностранных ученых (Новосибирск, 11-16 октября 2021 г.). – 2021а. – С. 164-167.

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

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

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

29. Марчук Г.И. Итерационные и квадратичные функционалы / Г.И. Марчук, Ю.А. Кузнецов – Новосибирск: Наука, 1972. – 205 с.

30. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики / Г.И. Марчук. – М.: Наука, 1977. – 456 с.
31. Митрофанов, Г.М. Совместная оценка линейных факторов в системах наблюдений метода ОГТ / Г.М.Митрофанов // Применение методов вычислительной математики и математической статистики при цифровой обработке данных сейсморазведки. – Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1975. – С. 166-186.
32. Митрофанов Г. М. Последовательное уточнение оценок линейных факторов при интерпретации данных сейсморазведки // Геология и геофизика. – 1978. – № 2. – С. 109-122.
33. Митрофанов, Г.М. Эффективное представление волнового поля в сейсморазведке / Г.М.Митрофанов // Геология и геофизика. – 1980. – № 4. – С. 135-145.
34. Митрофанов, Г.М. Обработка фазовых спектров многоканальных сейсмограмм / Г.М.Митрофанов // Геология и геофизика. – 1986. – № 10. – С. 99-109.
35. Митрофанов Г.М. Псевдоаприорная информация в задаче коррекции частотно-зависимой статики / Г.М. Митрофанов // Математические проблемы интерпретации данных сейсморазведки. – Новосибирск: Наука. – 1988. – С. 149-168.
36. Митрофанов Г.М. Формирование априорной информации при анализе и коррекции данных сейсмического метода отраженных волн / Г.М.Митрофанов, Н.А.Рачковская // Геология и геофизика. – 1996. – № 3. – С. 74-84.
37. Митрофанов Г.М. Развитие методов интерпретационной обработки сейсмических данных и оптимизации систем наблюдений на основе факторных представлений : дис. ... д-ра физ.-мат. наук : 25.00.10 / Митрофанов Георгий Михайлович. – 2014. – 297 с.

38. Митрофанов Г.М. Возможности факторной декомпозиции при анализе и обработке сейсмических данных [Электронный ресурс] [Электронный ресурс] / Г.М. Митрофанов, **Н.А. Горевячев** // Тюмень 2017: Геонауки - ключ к рациональному освоению недр: Материалы 5-ой научно-практической конференции (Тюмень, 27-30 марта 2017 г.). – 2017. – С. 04.

39. Митрофанов Г. М. Нелинейные преобразования сигналов с применением спектральных и факторных разложений (приложение к сейсморазведке): моногр. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – 444 с.

40. Митрофанов Г.М. Свидетельство о регистрации программы ЭВМ FADE2D / Г.М. Митрофанов, **Н.А. Горевячев**, Р.С. Кушнарв // Св-во о регистр. прогр. 2021664234; RU; №2021663286, заявл. 25.08.2021, опубл. 02.09.2021.

41. Митрофанов Г.М. Возможности факторной декомпозиции при реализации процедур обработки и интерпретации геофизических данных / Г.М. Митрофанов, **Н.А. Горевячев**, Р.С. Кушнарв // Геомодель 2023: 10-я Международная конференция Геонауки: время перемен, время перспектив: Сборник материалов конференции (Санкт-Петербург, Россия, 17-20 апреля 2023 г.). – 2023а. – С. 303-306.

42. Митрофанов Г.М. Применение факторной декомпозиции при определении априорной информации в задачах коррекции сейсмических данных / Г.М. Митрофанов, **Н.А. Горевячев**, Р.С. Кушнарв // Геомодель 2023: 10-я Международная конференция Геонауки: время перемен, время перспектив: Сборник материалов конференции (Санкт-Петербург, Россия, 17-20 апреля 2023 г.). – 2023б. – С. 307-310.

43. Митрофанов Г.М. Пример реализации процедуры поверхностно-согласованной корректировки амплитуд на основе факторной декомпозиции / Г.М. Митрофанов, **Н.А. Горевячев**, Р.С. Кушнарв // Геомодель 2023: 10-я Международная конференция Геонауки:

время перемен, время перспектив: Сборник материалов конференции (Санкт-Петербург, Россия, 17-20 апреля 2023 г.). – 2023в. – С. 335-338.

44. Определение априорной информации с применением факторного разложения в задачах коррекции сейсмических данных / Г.М. Митрофанов, **Н.А. Горевячев** [и др.] // Цифровые технологии в добыче углеводородов: цифровая независимость (Уфа, Россия, 17-20 октября 2023). – 2023г. – С. 134-135.

45. Оценка возможностей использования мгновенных динамических характеристик сейсмических записей при поисках нефти и газа / И.К.Бельфер [и др.] // Обзор ВИЭМС: Разведочная геофизика. – М.: Недра, 1986. – Т. 76. – С. 3.

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

47. Рао С.Р. Линейные статистические методы и их применения / С.Р. Рао – М.: Наука. – 1968. – 548 с.

48. Сысоев А.П. Коррекция формы сейсмического сигнала в МОВ на основе спектрально-статистического метода (ССМ) / А.П. Сысоев, А.А. Евдокимов // Геология и геофизика. – 1986. – № 5. – С. 94-103.

49. Сысоев А.П. Коррекция статистических поправок при обработке площадных систем наблюдения МОГТ / А.П. Сысоев, Г.М. Митрофанов // Геология и геофизика. – 1989. – № 12. – С. 114-122.

50. Сысоев А.П. Прикладные задачи компенсации неоднородности верхней части разреза при обработке и интерпретации сейсмических данных / А.П.Сысоев. – Новосибирск: ИНГГ им. А.А.Трофимука СО РАН, 2011. – 90 с.

51. Сысоев А.П. Анализ неединственности решения задачи расчета оператора поверхностно-согласованной деконволюции / А.П. Сысоев // Технологии сейсморазведки. – 2012. – № 03. – С. 27-30.

52. Учет изменения формы сейсмического сигнала при морских исследованиях / **Н.А. Горев** [и др.] // Инженерная геофизика 2016: Тезисы докладов 12-й научно-практической конференции и выставки (Анапа, Россия, 25-29 апреля 2016 г.). – 2016г. – С. М03.
53. Учет неоднородностей верхней части разреза в сейсморазведке. / В.С. Козырев, А.П. Жуков, И.П. Коротков, А.А. Жуков, М.Б. Шнеерсон. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр. – 2003. – С. 227.
54. Шварцман Ю. П. Коррекция длиннопериодных составляющих статических поправок при сейсморазведке методом ОГТ / Ю.П. Шварцман // Геология и геофизика. – 1979. – Т. 6. – С. 88-89.
55. Шварцман Ю.П. Итерационные алгоритмы решения систем уравнений статических поправок / Ю.П. Шварцман // Геология и геофизика. – 1978. – № 4. – С.76-85.
56. Шеффе Г. Дисперсионный анализ / Г. Шеффе. – М.: Наука. – 1980. – 512 с.
57. Application of Robust Surface-Consistent Deconvolution / N.S. Zhuravko [et al.] // Geomodel 2015-17th science and applied research conference on oil and gas geological exploration and development. – 2015. – V. 2015. – № 1. – P. 1-5.
58. AVO friendly seismic amplitude scaling in high impedance contrast surface conditions / A.F. AlJishi [et al.] // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2019. – 2019. – P. 640-643.
59. Baek H. Regularization of surface consistent processing: Decomposition of source and receiver functions / H. Baek, M. Mubarak, D. Zhang // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2019. – 2019. – P. 3001-3005.
60. Baranov K.V. Application of Unbiased Signal Amplitude Estimation for Surface-Consistent Amplitude Correction / K.V. Baranov, A.E. Korolev,

S.A. Polyanov // Geomodel 2021. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2021. – V. 2021. – № 1. – P. 1-5.

61. Cambois G. Surface-consistent deconvolution in the log/Fourier domain / G. Cambois, P.L. Stoffa // Geophysics. – 1992. – V. 57. – № 6. – P. 823-840.

62. Cambois G. Surface-consistent phase decomposition in the log/Fourier domain / G. Cambois, P.L. Stoffa // Geophysics. – 1993. – V. 58. – № 8. – P. 1099-1111.

63. Cary P.W. Four-component surface-consistent deconvolution / P.W. Cary, G.A. Lorentz // Geophysics. – 1993. – V. 58. – № 3. – P. 383-392.

64. Cary P. Questioning the basics of surface-consistent scaling / P. Cary, N. Nagarajappa // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2013. – 2013. – P. 418-422.

65. Colombo D. Surface-consistent amplitude balancing with refracted waves / D. Colombo, D. Rovetta, E. Sandoval-Curiel // SEG International Exposition and Annual Meeting 2018. – Anaheim, USA, 2018. – P. SEG-2018-2984472.

66. Faquan F. Highly effective refractor residual static corrections and its applications / F. Faquan, Z. Yusheng // Nonrecurring Meetings 2011: International Geophysical Conference. – Shenzhen, China, 2011. – P. 11-11.

67. The design of experiments / Fisher R. A. [et al.] – Edinburgh: Oliver and Boyd. – 1966. – 256 p.

68. Fully automated near-surface analysis by surface-consistent refraction method / D. Colombo [et al.] // Geophysics. – 2016. – V. 81. – № 4. – P. U39-U49.

69. **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.

70. Goldin S. V. Spectro-statistical method of analysis and processing of wave fields in seismic exploration / S.V.Goldin, G.M.Mitrofanov // Expanded abstracts, 60-th Annual SEG meeting, Tulsa. – 1990. – P. 253-257.
71. Gülünay N. The diminishing residual matrices method for surface-consistent statics—A review // *Geophysics*. – 2017. – V. 82. – № 4. – P. V257-V274.
72. Harris F.J. On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform / F.J. Harris // *Proceedings of the IEEE*. – 1978. – V. 66. – № 1. – P. 51-83.
73. Kazemi N. Surface-consistent sparse multichannel blind deconvolution of seismic signals / N. Kazemi, E. Bongajum, M.D. Sacchi // *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*. – 2016. – V. 54. – № 6. – P. 3200-3207.
74. Kirkham D.J., Poggiagliolmi E. Long period statics determination by inverse filtering / D.J. Kirkham, E. Poggiagliolmi // *Geophysical Prospecting*. – 1976. – V. 24. – № 4. – P. 737-755.
75. Kirchheimer F. Robust surface-consistent deconvolution with noise suppression / F. Kirchheimer, R. Ferber // *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2001*. – 2001. – P. 1831-1834.
76. Kovaljev V.P. Complex convolution decomposition (CCD) and new possibilities at detail investigation of attenuation / V.P. Kovaljev, A.G. Madatov, G.M. Mitrofanov // *Extended abstracts of papers, EAGE 54th meeting*. – Paris: EAGE, 1992. – P. 746-747.
77. Levin S.A. Surface-consistent deconvolution / S.A. Levin // *Geophysics*. – 1989. – V. 54(9). – P. 1123-1133.
78. Mitrofanov G. Features of phase spectrum and its calculation in seismic data processing / G. Mitrofanov, V. Priimenko // *Revista Brasileira de Geofísica*. – 2012. – V. 30(1). – P. 15-29.

79. Mitrofanov G.M. 3D Data Processing with Factor Models Application / G.M. Mitrofanov, **N.A. Goreyavchev** // Tyumen 2019. – 2019. – V. 2019. – №. 1. – P. 1-5.

80. Mitrofanov G.M. To the problem of long-period statics / G.M. Mitrofanov, V.I. Priimenko, **N.A. Goreyavchev** // Proceedings of the 16th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and Expogef (Rio de Janeiro, Brazil, 19-22 August, 2019). – 2019. – P. 1-6.

81. 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.

82. 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.

83. Nagarajappa N. Unbiased surface-consistent scalar estimation by crosscorrelation / N. Nagarajappa, P. Cary // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2015. – 2015. – P. 2337-2341.

84. Near-surface full-waveform inversion in a transmission surface-consistent scheme / D. Colombo [et al.] // Geophysics. – 2021. – V. 86. – №. 2. – P. U15-U29.

85. Quality control of surface-consistent deconvolution on land dynamite data / J. Zhang [et al.] // The Leading Edge. – 2015. – V. 34. – №. 4. – P. 430-436.

86. Results of Processing of 3D Data Acquired Using GLIDE Technology, Eastern Siberia Region / P.S. Bekeshko [et al.] // Geomodel 2021. – 2021. – V. 2021. – №. 1. – P. 1-5.

87. Stein J.A. A successful statics methodology for land data / J.A. Stein, T. Langston, S.E. Larson // The Leading Edge. – 2009. – V. 28. – №. 2. – P. 222-226.

88. Surface-consistent deconvolution using reciprocity and waveform inversion / R.van Vossen [et al.] // *Geophysics*. – 2006. – V. 71. – P. V19-V30.
89. Surface-consistent residual statics estimation with genetic algorithms - An application to a near-surface seismic survey / M. Aleardi [et al.] // *Near Surface Geoscience 2016 - 22nd European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2016. – V. 2016. – № 1. – P. cp-495-00007.
90. Taner M. Estimation and correction of near-surface time anomalies / M. Taner, F. Koehler, K. Alhilali // *Geophysics*. – 1974. – V. 39. – №. 4. – P. 441-463.
91. Taner M.T. Surface consistent corrections / M.T.Taner, F.Koehler // *Geophysics*. – 1981. – V. 46(1). – P. 17–22.
92. The impact of increased data density on a land processing workflow / G. Alexander et al. // *SEG International Exposition and Annual Meeting*. – 2017. – P. SEG-2017-17664341.
93. van Vossen R. Full-waveform static corrections using blind channel identification / R.van Vossen, J.Trampert // *Geophysics*. – 2007. – V. 72. –№.4. – P. U55-U66.
94. Wiggins R.A. Residual statics analysis as a general linear inverse problem / R.A. Wiggins, K.L. Larner, R.D. Wisecup // *Geophysics*. – 1976. – V. 41. – № 5. – P. 922-938.
95. Young D. M. Iterative solution of large linear systems. / D.M. Young – Elsevier. – 2014. – P. 570.

СПИСОК ИЛЛЮСТРАТИВНОГО МАТЕРИАЛА

Рисунок 1 – Пример двухмерной системы сейсмических наблюдений (верхний рисунок) и построенной для нее матрицы X (нижний рисунок).

Рисунок 2 – Влияние типа системы наблюдений на вид матрицы X . (а) Два типа систем наблюдений и (б) соответствующие им матрицы, полученные для двухфакторной модели.

Рисунок 3 – Два типа систем наблюдения и значения сингулярных чисел матрицы X . Верхний рисунок – два типа систем наблюдения с разным числом приемников и нижний рисунок – значения сингулярных чисел для них.

Рисунок 4 – Синтетическая 2D система сейсмических наблюдений, красные треугольники – положение источников, синие треугольники – положение приёмников.

Рисунок 5 – Синтетические наблюдения, полученные в рамках 2-х факторной модели. В случае реального эксперимента каждому из наблюдений может соответствовать значение амплитуды трассы, времени или спектра.

Рисунок 6 – Исходная матрица X для синтетической системы наблюдений, прослеживается блочная структура – первые 10 столбцов соответствуют факторам источника, последующие факторам приёмника. Белый цвет соответствует нулевым значениям.

Рисунок 7 – Матрица X с дополнением для синтетической системы наблюдений, строка с константой на источниках добавлена в нижней части матрицы. Белый цвет соответствует нулевым значениям.

Рисунок 8 – Матрица A , полученная по матрице X с рисунка 7. Белый цвет соответствует нулевым значениям. Важным моментом является количество ненулевых наблюдений (а именно 100 элементов в пределах первых 11 строк и первых 11 столбцов).

Рисунок 9 – Матрица A , дополненная строкой и столбцом с зафиксированной константой в пределах фактора источника.

Рисунок 10 – Сопоставление решений, полученных с помощью дополнения матрицы **X** и матрицы **A**.

Рисунок 11 – Сопоставление векторов наблюдений, полученных через дополнение матрицы **X** (верхний левый рисунок), через дополнение матрицы **A** (верхний правый рисунок). Разница между векторами наблюдений, полученными в ходе факторной декомпозиции, представлена на левом и правом нижнем рисунках соответственно. Горизонтальная ось одинакова для всех рисунков. Относительная ошибка по норме L2 в случае дополнения матрицы **X** составила $3.392e-15$, в случае дополнения матрицы **A** - $7.7013e-14$.

Рисунок 12 – Разные варианты дополнений матрицы **X**. Слева – дополнение константой вдоль всех источников (нижняя строка матрицы), справа – дополнение одним значением на 6 источнике (нижняя строка матрицы).

Рисунок 13 – Матрицы **A**, полученные по матрицам **X** с рисунка 12. Белый цвет соответствует нулевым значениям.

Рисунок 14 – Различие между решениями, полученным по дополнениям одной и несколькими константами. Первые 11 значений – фактор источника, остальные фактор приемника.

Рисунок 15 – Сопоставление векторов наблюдений, полученных через дополнение матрицы **X** несколькими значениями (верхний левый рисунок), через дополнение матрицы **X** одним значением (верхний правый рисунок). Разница между векторами наблюдений, полученными в ходе факторной декомпозиции, представлена на левом и правом нижнем рисунках соответственно. Горизонтальная ось одинакова для всех рисунков. Относительная ошибка по норме L2 в случае дополнения матрицы **X** составила $3.392e-15$, в случае дополнения матрицы **A** - $6.768e-14$.

Рисунок 16 – Синтетическая система сейсмических наблюдений. Красными треугольниками обозначено положения источников, синими – положение приёмников. Зеленые треугольники обозначают положение приёмников в активной расстановке, черный треугольник обозначает источник в активной расстановке.

Рисунок 17 – Синтетические значения факторов. На левом рисунке показан фактор источника, на правом — фактор приемника.

Рисунок 18 – Значения факторов, рассчитанные с использованием итеративного метода LSQR. На левом рисунке представлен фактор источника, на правом — фактор приемника.

Рисунок 19 – Значения факторов, рассчитанные с применением итеративного метода BICGSTAB. На левом рисунке изображен фактор источника, на правом изображен фактор приемника.

Рисунок 20 – Значения факторов, рассчитанные с использованием прямого решателя — разложения Холецкого. На левом рисунке показан фактор источника, на правом изображен фактор приемника.

Рисунок 21 – Синтетическая система сейсмических наблюдений. Красными треугольниками обозначено положения источников, синими — положение приёмников. Зеленые треугольники обозначают положение приёмников в активной расстановке, черный треугольник обозначает источник в активной расстановке.

Рисунок 22 – Сравнение итеративных методов (LSQR – синий цвет и LSQR с предобуславливателем Гаусса-Зейделя – оранжевый цвет) и прямого обращения матрицы на основе разложения Холецкого – зеленая точка.

Рисунок 23 – Геометрическое расположение факторов на площади и сингулярное разложение матрицы A для данной системы наблюдений.

Рисунок 24 – Геометрическое расположение факторов на площади с бинированием и сингулярное разложение матрицы A для данной системы наблюдений. Бинирование позволило учесть оставшиеся 3 некондиционных сингулярных числа, а значит 4-х условий хватает для устойчивого обращения матрицы.

Рисунок 25 – Связность системы наблюдений (160 источник, 16 приёмников в расстановке).

Рисунок 26 – Синтетические данные (период вариаций – 1 длина расстановки), двухфакторная модель, синие линии соответствуют фактору α –

координата источника, красные линии фактору β – координата приёма. Вертикальные оси рисунков показывают амплитуду синусоид, горизонтальные – номер отсчета или номер фактора (i,j).

Рисунок 27 – Синтетические данные (период вариаций – 1.5 длины расстановки), двухфакторная модель, синие линии соответствуют фактору α – координата источника, красные линии фактору β – координата приёма. Вертикальные оси рисунков показывают амплитуду синусоид, горизонтальные – номер отсчета или номер фактора (i,j).

Рисунок 28 – Синтетические данные, трехфакторная модель, синие линии соответствуют фактору α – координата источника, красные линии фактору β – координата приёма, зелёные – фактору γ – координата ОЦТ. Вертикальные оси рисунков показывают амплитуду синусоид, горизонтальные – номер отсчета или номер фактора (i,j).

Рисунок 29 – Синтетические данные, четырехфакторная модель, синие линии соответствуют фактору α – координата источника, красные линии фактору β – координата приёма, зелёные – фактору γ – координата ОЦТ, фиолетовые – фактору ξ – равные удаления. Вертикальные оси рисунков показывают амплитуду синусоид, горизонтальные – номер отсчета или номер фактора (i,j).

Рисунок 30 – Сравнение оценок вариаций в сейсмических данных двумя методами (матричное дополнение и итерационное решение) в рамках трехфакторной модели (источник – приёмник – ОСТ).

Рисунок 31 – Сравнение оценок вариаций в сейсмических данных двумя методами (матричное дополнение и псевдоинверсия) в рамках трехфакторной модели (источник – приёмник – ОСТ).

Рисунок 32 – Синтетическая система сейсмических наблюдений. Красными треугольниками обозначено положения источников, синими – положение приёмников. Зеленые треугольники обозначают положение приёмников в активной расстановке, черный треугольник обозначает источник в активной расстановке.

Рисунок 33 – Синтетические значения факторов. Левый рисунок – фактор источника (модель длиннопериодной вариации), правый рисунок – фактор приёмника.

Рисунок 34 – SVD – разложение матрицы $\mathbf{A}$ (левый рисунок) для системы наблюдений с рисунка 32, SVD – разложение матрицы $\mathbf{A}$ после дополнения константной (правый рисунок).

Рисунок 35 – Оценка факторов на основе разложения Холецкого в рамках алгоритма дополнения матрицы. Левый рисунок – оценка фактора источника, правый рисунок – оценка фактора приёмника.

Рисунок 36 – Сравнение сходимости итеративных решателей. Левый рисунок – зависимость допустимого отклонения (логарифмический масштаб) от времени вычисления. Правый рисунок – зависимость допустимого отклонения (логарифмический масштаб) от количества итераций необходимого для получения решения. Синяя линия – метод LSQR, оранжевая линия – метод BICGSTAB.

Рисунок 37 – Оценка факторов на основе итеративного метода BICGSTAB. Левый рисунок – оценка фактора источника, правый рисунок – оценка фактора приёмника.

Рисунок 38 – Оценка факторов на основе итеративного метода LSQR. Левый рисунок – оценка фактора источника, правый рисунок – оценка фактора приёмника.

Рисунок 39 – Гистограммы, построенные по разностям модельных входных данных и оценок, полученных на основе различных методов. Левая гистограмма – обращение через разложение Холецкого, центральная гистограмма – итеративный метод LSQR, правая гистограмма – итеративный метод BICGSTAB.

Рисунок 40 – Выполнение деконволюции на синтетических данных (до – верхний рисунок, после – нижний)

Рисунок 41 – Амплитудные спектры синтетических сигналов (до – левый рисунок, после – правый).

Рисунок 42 – Зависимость точности полученного решения от времени вычисления. Синий цвет обозначает итеративный метод LSQR, оранжевый — итеративный метод BICGSTAB, а зеленая точка соответствует прямому решению через разложение Холецкого

Рисунок 43 – Морские данные представлены в виде выборки по каналам (13, 14, 15) из системы наблюдений. Типы сейсмических волн обозначены буквами: А – прямая волна, Б – волна, отражённая от поверхности моря, В – волна, отражённая от морского дна, Г – область кратных волн разного происхождения.

Рисунок 44 – Схема расстановки для наблюдений с заглубленной многоканальной косой.

Рисунок 45 – Электроискровой источник «Спаркер» и его амплитудный спектр.

Рисунок 46 – 16-канальная сейсмическая коса.

Рисунок 47 – Участок прямой волны. Зеленым цветом показана пикировка положительной фазы.

Рисунок 48 – Форма сигнала прямой волны на интервале 7 мс для разных трасс (левый рисунок) и их амплитудный спектр (рисунок справа).

Рисунок 49 – Окно Тьюки и его амплитудная характеристика.

Рисунок 50 – Гистограмма, построенная всем значениям амплитудного спектра на частоте 600 Hz.

Рисунок 51 – Оценки факторов на центральной частоте 600 Гц, рассчитанные в рамках трехфакторной модели на основе логарифмов амплитудных спектров прямой волны. По вертикальной оси отложены значения нормированных логарифмов амплитудных спектров, по горизонтальной оси — номер фактора.

Рисунок 52 – Результат коррекции формы сигнала прямой волны. На верхнем рисунке представлена исходная форма сигнала. На нижнем рисунке показана форма сигнала прямой волны после корректировки (компенсация трех факторов: источник, приемник и удаление).

Рисунок 53 – Результат корректировки формы сигнала прямой волны, потрассное представление. Левый рисунок – исходная форма сигнала. Правый рисунок – форма сигнала прямой волны после корректировки (компенсация трех факторов – источник, приемник удаление).

Рисунок 54 – Гистограммы (А – исходные амплитудные спектры) и (Б – шумовая составляющая), вертикальная ось гистограмм соответствует количеству значений, горизонтальная – нормированным значениям логарифмов амплитудных спектров. Горизонтальная ось характеризует вариативность амплитудных спектров.

Рисунок 55 – Гистограммы (А – исходные амплитудные спектры) и (Б – шумовая составляющая), вертикальная ось гистограмм соответствует количеству значений, горизонтальная – нормированным значениям логарифмов амплитудных спектров. Горизонтальная ось характеризует вариативность амплитудных спектров.

Рисунок 56 – Фрагмент сейсмограмм до и после поверхностно-согласованной деконволюции (левый рисунок – исходные сейсмограммы, средний – дековолюция в пакете Geovation, правый – деконволюция алгоритмом дополнений).

Рисунок 57 – 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).

Рисунок 58 – Сравнение факторов, полученных в промышленном пакете обработки Geovation (левый столбец рисунков) и факторов, полученных алгоритмом поверхностно-согласованной компенсации амплитуд на основе разработанного алгоритма. Единицы измерений по осям X,Y – метры.

Рисунок 59 – Отклонение между полученными решениями в процентах. Левый рисунок – карта отклонений по источникам, правый рисунок – карта отклонений по приёмникам. Отклонение решений составило не больше 3%. Единицы измерений по осям X,Y – метры.

Рисунок 60 – Сравнение суммарных временных разрезов: левый разрез – до введения поправок, средний разрез – с включением поправок, определенных в производственном пакете Geovation, правый разрез – с включением поправок, определенных разработанным алгоритмом.

Рисунок 61 – Сравнение карты RMS амплитуд, построенных в окне 500-1100 мс по суммарному кубу: левая карта – до введения поправок, средняя карта – с включением поправок, определенных в производственном пакете Geovation, правая карта – с включением поправок, определенных разработанным алгоритмом.

Рисунок 62 – Сравнение гистограмм амплитуд, построенных в окне 500-1100 мс по данным до суммирования (левый рисунок): синяя гистограмма – исходные амплитуды, до введения поправок, коричневая гистограмма – амплитуды с включением поправок, определенных в производственном пакете Geovation, зеленая карта – амплитуды с включением поправок, определенных при помощи разработанного алгоритма. Правый рисунок – те же гистограммы, вид сверху.

Рисунок 63 – Сравнение факторов (источники и приёмники), полученных в промышленном пакете обработки Geovation (левый столбец рисунков) и полученных алгоритмом поверхностно-согласованной компенсации амплитуд на основе разработанного алгоритма. Единицы измерений по осям X,Y – метры.

Рисунок 64 – Сравнение факторов (ОГТ), полученных в промышленном пакете обработки Geovation (левый столбец рисунков) и полученных алгоритмом поверхностно-согласованной компенсации амплитуд на основе разработанного алгоритма. Единицы измерений по осям X,Y – метры.

Рисунок 65 – Сравнение факторов (удаления) – левый рисунок, сравнение факторов (азимуты) – правый рисунок, полученных в промышленном пакете обработки Geovation (оранжевые точки) и полученных алгоритмом поверхностно-согласованной компенсации амплитуд на основе разработанного алгоритма (синие точки). Единицы измерений по осям X,Y – метры.