

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА
ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи

Казанин Геннадий Алексеевич

**Разработка технологии разделения сигналов
при перекрывающимся отстреле площади морских 3D-4С
сейсмических наблюдений двумя источниками**

1.6.9. Геофизика

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Гайнанов Валерий Гарифьянович

Москва – 2025

Оглавление

Введение.....	4
Глава 1. Современные методики и практики проведения сейсморазведочных работ с перекрывающимися источниками на суше и шельфе	10
1.1. История возникновения методики сейсморазведочных работ с перекрывающимся возбуждением сигнала	10
1.2. Сейсморазведочные работы с перекрывающимся возбуждением сигнала на суше	13
Управляемое одновременное вибрирование	13
Независимое одновременное вибрирование	15
Обработка данных ISS	19
Методические особенности проведения работ методом ISS	25
Выводы: сейсморазведка с перекрывающимися источниками на суше.....	26
1.3. Сейсморазведочные работы с перекрывающимся возбуждением сигнала на шельфе ...	27
Современные морские сейсмические съемки	27
Отличия в методике проведения сейсморазведочных работ на суше и в море	31
Примеры сейсмических съемок с перекрывающимся возбуждением на море.....	35
1.4. Выводы к главе 1	38
Глава 2. Разработка алгоритма разделения сигналов от перекрывающихся источников на основе инверсии	40
2.1. Матричная модель сейсмических данных	40
2.2. Представление сейсмических данных при перекрывающемся возбуждении нескольких источников	42
2.3. Разработка методики разделения данных перекрывающихся источников на основе инверсии	44
Псевдо-деблендинг	44
Применение разреженной инверсии для деблендинга сейсмических данных	45
Алгоритм деблендинга на основе разреженной инверсии.....	47
2.4. Выбор разреженного преобразования для использования в алгоритме	50
Разреженные преобразования	50
Выбор разреженного преобразования.....	50
2.5. Влияние случайной задержки между выстрелами на характер интерференции при смешивании данных	55
2.6. Выводы к главе 2	58
Глава 3. Разделение сигналов от перекрывающихся источников на примере синтетически смешанных данных	60
3.1. Исходные данные и схема смешивания	60
3.2. Инициализация алгоритма подавления интерференции	65
3.3. Результаты и обсуждение	69

3.4. Выводы к главе 3	74
Глава 4. Разделение сигналов от перекрывающихся источников на примере данных ОМР	75
4.1. Анализ исходного набора данных	75
Анализ времен возбуждения источников	75
Геометрия опытно-методической съемки	79
Анализ исходных сейсмограмм	80
4.2. Подавление интерференции и анализ результатов	84
4.3. Методические рекомендации по проведению полевых работ с перекрывающимися источниками на шельфе	95
Заключение	96
Рекомендации и перспективы	96
Список литературы	98
Список иллюстраций	104
Список таблиц	108

Введение

Актуальность темы исследования

Современные методики проведения сейсморазведочных работ на шельфе требуют применения новых подходов, позволяющих повысить качество и разрешающую способность получаемой сейсмической информации. Качество сейсмического изображения в значительной степени определяется плотностью размещения источников и приёмников. Чем меньше шаг по приёмникам и чем выше частота возбуждений, тем выше разрешение и информативность регистрируемых данных, но тем выше и стоимость съёмки. На современном этапе развития сейсморазведки узким местом уже не является приёмная система: нодальные системы позволяют развертывать крупномасштабные массивы приемников с высокой плотностью наблюдений, обеспечивая устойчивую регистрацию трех (на суше) или четырех компонент (на шельфе). Ключевым ограничением остаются источники: в классической методике, для исключения интерференции, в момент записи работает только один источник. Это крайне ограничивает интервал возбуждений и снижает эффективность полевых работ.

Одним из наиболее перспективных направлений в этой области является методика сейсмической съёмки с многократным перекрывающимся возбуждением сейсмических источников. Такой подход позволяет значительно повысить качество получаемых данных и снизить стоимость полевых работ за счет сокращения времени проведения исследований и увеличения плотности регистрации данных. Это особенно актуально в условиях коротких полевых сезонов на Арктическом шельфе, где климатические условия зачастую не позволяют проводить сейсмические работы более 60–90 дней. Дополнительно актуальность возрастает в связи с дефицитом специализированного научного флота, что ограничивает возможности применения традиционных методов съёмки и делает технологию перекрывающихся возбуждений источников практически единственным способом увеличения объемов полевых исследований.

Однако применение этой технологии требует решения сложной задачи разделения наложенных сигналов, обуславливающую актуальность разработки специализированных алгоритмов обработки и восстановления исходных волновых полей.

Автором предложен и успешно реализован на практике алгоритм разделения сигналов от перекрывающихся источников, основанный на применении разреженной инверсии с применением метода итеративного жесткого порога. Дополнительно выполнен анализ результатов опытно-методических работ с перекрывающимися источниками и сформулированы методические рекомендации по организации и проведению подобных съёмок.

Степень разработанности

Вопросы, связанные с разделением сигналов, полученных методом многократных перекрывающихся возбуждений на шельфе, активно исследуются в последние два десятилетия. Первоначально разработка темы была связана с применением традиционных подходов фильтрации в частотной и временной областях (Chen et al., 2014; Chen, 2015; Chen et al. 2020; Gan et al., 2016). Однако оказалось, что фильтрационные методы эффективны лишь в простых случаях, когда наложение сигналов незначительно, и слабо применимы при сильном перекрытии и высокой сложности данных (Ibanez et al., 2022).

В последние годы значительное внимание уделяется подходам, основанным на использовании разреженных представлений сигналов и итерационных методов инверсии. В зарубежной литературе представлены многочисленные исследования и публикации (Mahdad et al., 2011; Ibrahim, Sacchi, 2014; Gong et al., 2017; Chen et al., 2018; Ji et al., 2019; Ibrahim, Trad, 2019; Kumar et al., 2021; Mahmodian et al., 2023), демонстрирующие преимущества указанных методов и их эффективность в задачах разделения наложенных сейсмических сигналов, особенно при сложных условиях перекрытия и наличии шума.

Также в современной литературе активно исследуется применение методов машинного обучения и нейронных сетей для разделения перекрывающихся сейсмических сигналов (Sun 2022; Lin, Wang, 2024; Luiken, Ravasi, 2024). Однако эти технологии находятся в стадии разработки и пока не получили широкого практического распространения.

Зарубежный опыт и литература, несмотря на активное развитие этих подходов, в настоящее время не нашли отражения в отечественной практике морских сейсморазведочных работ. В России отсутствуют примеры успешного применения разреженной инверсии на шельфе, не разработаны конкретные алгоритмы, требования и методические рекомендации для морской съемки с несколькими источниками. Доступные отечественные публикации ограничены отдельными примерами применения фильтрационных методов преимущественно для наземных сейсмических исследований (Ошкин и др., 2019; Коротков, Жуков, 2020; Жуков и др., 2022), тогда как подходы на основе инверсии и разреженного представления данных не освоены и требуют дополнительного изучения и разработки.

Цель работы

В рамках исследования предполагается сформулировать и обосновать требования к проведению морских сейсморазведочных работ с несколькими источниками, разработать алгоритм разделения сейсмических полей на основе разреженных представлений сигналов и выполнить его апробацию на синтетических моделях и реальных данных, полученных в ходе опытно-методических исследований на шельфе.

Основные задачи исследования

1. Проанализировать современные методики полевых работ с перекрывающимися источниками на суше и шельфе.
2. Формализовать теорию смешивания сигналов от перекрывающихся источников и ее операторное (матричное) представление.
3. Разработать и реализовать алгоритм разделения наложенных сигналов на основе разреженной инверсии.
4. Оценить влияние случайных временных задержек выстрелов на качество разделения сигналов в морских условиях.
5. Испытать алгоритм на синтетически смешанных и реальных полевых данных опытно-методических работ на шельфе.
6. Сформулировать требования и рекомендации к методике морских сейсмических съемок с перекрывающимися источниками: система наблюдений, технология выполнения и контроль качества.

Методология и методы исследования

В ходе работ автор использовал данные, предоставленные АО «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция», полученные в ходе опытно-методических работ на шельфе острова Сахалин с применением перекрывающихся источников в 2022 году. В целях построения синтетически смешанных данных задействованы данные, полученные в ходе сейсмических работ 3D-4C. Для реализации алгоритма разделения наложенных сигналов применяется язык программирования Python и открытые библиотеки для обработки сейсмических данных, работы с линейными операторами и решением обратных задач Pylops и PyProximal. Визуализация и анализ полученных данных осуществляется с помощью специализированного программного комплекса Альтаир-М.

Научная новизна

1. Разработан и реализован оригинальный алгоритм разделения перекрывающихся сигналов, основанный на методе итеративного жесткого порога и разреженного представления о данных.
2. Впервые выполнено разделение сейсмических данных, полученных методом перекрывающихся источников, на основе реальных записей донного оборудования, полученных на шельфе Российской Федерации (о. Сахалин).
3. Разработаны требования и методические рекомендации по организации и проведению морских сейсморазведочных работ с донным оборудованием при применении перекрывающихся источников на шельфе.

Практическая значимость

Значимость работы заключается в развитии и углублении представлений о методах разделения перекрывающихся сигналов с использованием подходов разреженного представления данных с применением инверсии. Систематизированы и расширены научные знания о применении метода итеративного жесткого порога к задаче разделения наложенных сейсмических сигналов. Полученные теоретические результаты могут послужить основой для дальнейших исследований и продолжения создания алгоритмов разделения данных от перекрывающихся источников.

Практическая значимость заключается в разработке методических рекомендаций, методики обработки и требований к организации полевых работ с перекрывающимися источниками. Методика с перекрывающимися источниками позволяет существенно снизить временные и финансовые затраты на съемку при сохранении высокого качества сейсмических данных. Разработанный и апробированный на реальных данных алгоритм разделения наложенных сигналов реализован в виде программного обеспечения, которое может быть использовано в обработке данных будущих полевых работ с перекрывающимися источниками. Полученные научные и практические результаты открывают перспективу дальнейшего расширения применения разработанных методов, как в сейсморазведке на шельфе, так и в сейсморазведке на суше, где разработанный алгоритм может быть использован для подавления интерференции в данных, полученных по методике независимого одновременного вибрирования (Independent Simultaneous Source, ISS).

Защищаемые положения

1. Разработанный алгоритм разделения сейсмических данных, основанный на решении задачи разреженного приближения с применением метода итеративного жесткого порога позволяет эффективно разделить сигнал от нескольких источников, что подтверждается тестами на синтетических и реальных данных.
2. Применение оконного 3D преобразования Фурье в качестве разреженного преобразования в задаче разделения сигнала от перекрывающихся источников позволяет эффективно концентрировать полезный сигнал, обеспечивая высокую точность реконструкции сейсмических данных.
3. Для эффективного разделения сигналов при перекрывающемся возбуждении источников на шельфе необходимо соблюдать следующие требования к проведению полевых работ: полное документирование координат и времен возбуждения источников, использование регулярной сети пунктов возбуждения и непрерывной регистрации, использование случайных задержек при возбуждении сигналов в диапазоне от ± 0.25 с до ± 1.0 с.

Степень достоверности результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается успешной апробацией предложенного подхода на синтетических и реальных данных. Полученные результаты полностью соответствуют априорным знаниям и фактам.

Апробация работы

Основные положения диссертационного исследования представлены автором на международных конференциях: «ГеоПотенциал – 2025. Стратегические векторы развития геолого-геофизических работ в современных реалиях», Сочи, 2025 г; VIII Международная геолого-геофизическая конференция и выставка «ГеоЕвразия – 2025. Геологоразведочные технологии – наука и бизнес», Москва, 2025 г.

По результатам исследования получено 1 свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ¹.

Личный вклад

Автор самостоятельно выполнил все исследования, представленные в данной работе, в том числе разработку и программирование алгоритма разделения сигналов от перекрывающихся источников. Визуализация результатов обработки данных была выполнена совместно с коллегами из АО «МАГЭ». В публикациях, где автор представлен первым автором, основополагающий вклад принадлежит соискателю.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 6 работ, из них 4 научные статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ.

¹Казанин Г.А. Программа для разделения (деблендинга) сейсмических данных при перекрывающемся возбуждении сигналов. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025684209 от 11.09.2025

Благодарности

Автор искренне благодарен своему научному руководителю Гайнанову В.Г. за поддержку и доверие на каждом этапе научной работы.

Автор выражает огромную благодарность коллективу АО «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция». Персонально: С.О. Базилевичу за значительный вклад в развитие методик сейсморазведочных работ, полезные советы и данные о современных работах 3D-4C; А.В. Литвачуку за содействие и сопровождения на всех этапах работы; А.В. Ткачу и Д.Г. Куоме за помощь в подготовке исходных сейсмических данных и результатов работы, помощь в освоении пакета обработки сейсмических данных Альтаир-М.

Искренняя благодарность своей семье за помощь, вдохновение и веру в успех, невесте Нафигуллиной Елене Рафаиловне за эмоциональную опору, веру в достижение цели и терпение. Особые слова благодарности автор хотел бы выразить Казанину Алексею Геннадьевичу за его поддержку и мудрые советы на всех этапах подготовки этой диссертации.

Работа посвящается Казанину Геннадию Семеновичу.

Глава 1. Современные методики и практики проведения сейсморазведочных работ с перекрывающимися источниками на суше и шельфе²

1.1. История возникновения методики сейсморазведочных работ с перекрывающимся возбуждением сигнала

Сейсмическая разведка остается ключевым методом оценки ресурсов и запасов углеводородов как на суше, так и на шельфе. Однако сейсморазведочные работы трудоемки, дороги и сопровождаются все более строгими требованиями к качеству и плотности съемки, что увеличивает их стоимость. Это стимулирует разработку новых методик выполнения полевых работ, направленных на повышения качества и снижение затрат.

Затраты на сейсмическую съёмку, как правило, включают мобилизацию и демобилизацию партии, расходы на оборудование и его обслуживание, получение разрешений, оплату труда персонала и прочие операционные издержки. При этом ключевым фактором стоимости остается продолжительность полевых работ. Контракты с подрядчиками обычно предусматривают фиксированную ставку за мобилизацию и демобилизацию и ежедневную ставку. Соответственно, сокращение сроков съемки снижает общую стоимость и цену за квадратный километр сейсмической съемки.

Качество получаемого сейсмического изображения во многом определяется плотностью размещения источников и приемников. Чем ближе друг к другу расположены приемники и чем чаще выполняются возбуждения сейсмических сигналов, тем выше разрешение и качество зарегистрированных данных (рисунок 1.1) и тем выше расходы на сейсмическую съемку. На современном этапе развития наземной сейсморазведки лимитирующим фактором больше не являются сейсмоприемники. Развитие нодальных технологий позволило быстро и эффективно развертывать крупномасштабные массивы приемников, обеспечивая высокую плотность наблюдений и устойчивую регистрацию данных даже в труднодоступных районах. Ключевым ограничением для увеличения плотности возбуждения сигнала остаются именно источники, поскольку для исключения интерференции в традиционной съемке требуется, чтобы в момент записи работал только один источник. Это существенно ограничивает частоту возбуждений и снижает эффективность полевых работ.

²При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ отражены основные результаты, положения и выводы исследования: **Казанин Г.А.,** Гайнанов В.Г. Технологии разделения сигналов при перекрывающемся отстреле площади морских сейсмических исследований // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. Т. 64. № 4. 2025. С. 103–106. EDN: LYFKRL (0,43 п.л., вклад автора 60 %). Импакт-фактор 0,288 (РИНЦ)

3D Буксируемые косы

Донные косы

Плотная съёмка с донными косами

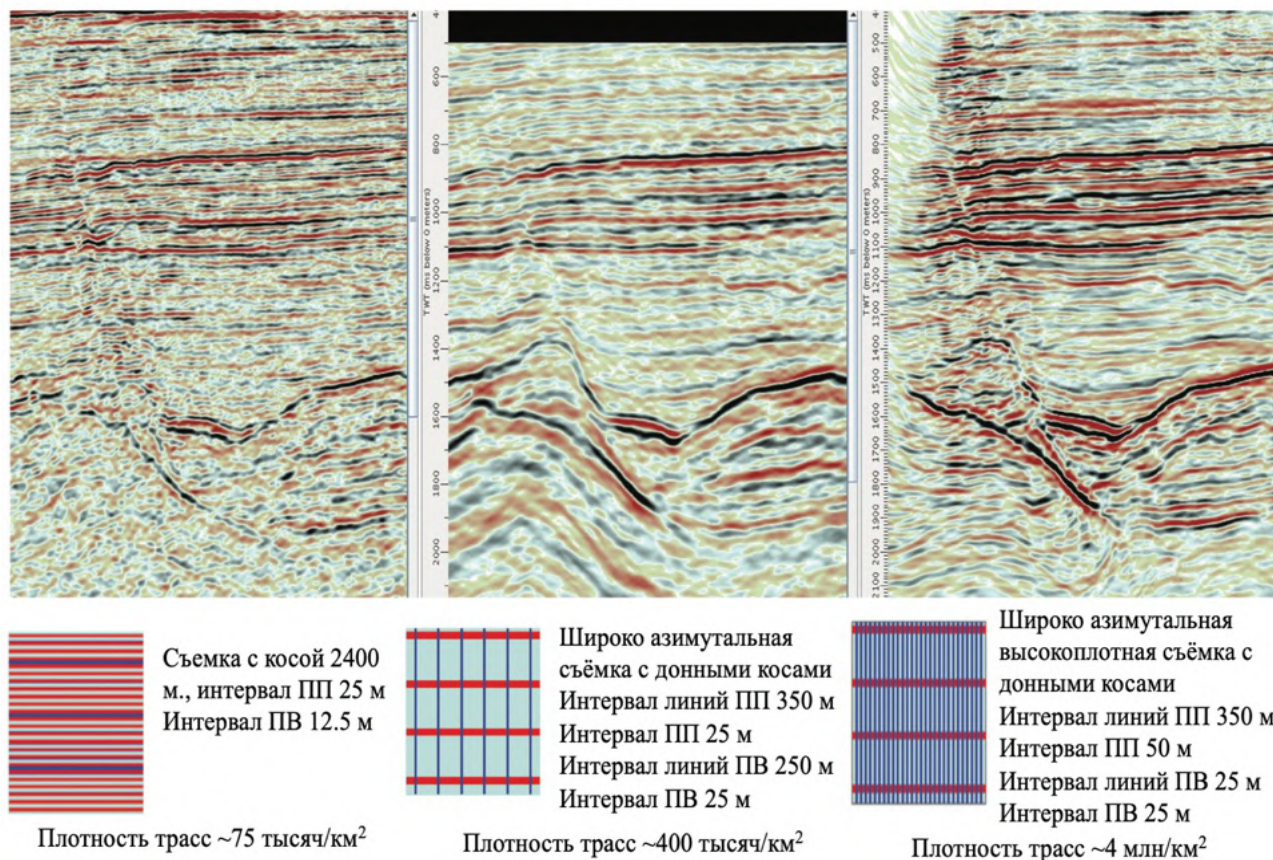


Рисунок 1.1. Сравнение морских сейсмических съёмок с различной плотностью трасс (Abma, Foster, 2020).

Для преодоления данных ограничений все чаще применяются методики с перекрывающимся возбуждением сигналов, предложенные Beasley et al. (1998) и Berkhout (2008). В отличие от классического подхода, где источники срабатывают поочередно, методика с перекрывающимися источниками допускает одновременную или частично перекрывающуюся работу нескольких источников. Это позволяет существенно сократить продолжительность полевых работ, и, следовательно, затраты на их проведение, или увеличить плотность возбуждения сигналов и качество сейсмических данных при аналогичных временных затратах на проведение съемки относительно традиционной методики. Кроме того, эти два подхода можно совмещать, что позволяет объединить их преимущества. Эта зависимость схематично показана на рисунке 1.2, где сравнивается съемка с перекрывающимися источниками и традиционная съемка с точки зрения стоимости и качества.

Для оценки увеличения производительности и продуктивности сейсмической съёмки с несколькими источниками по отношению к классической методике Berkhout (2008) предложил два основных индикатора: отношение плотности ПВ и отношение времени выполнения съёмки.

Отношение плотности ПВ (SDR) выражается как отношение количества ПВ в съёмке с перекрывающимися источниками к количеству ПВ в классической съёмке:

$$SDR = \frac{\text{Количество ПВ в съёмке с перекрывающимся возбуждением}}{\text{Количество ПВ в классической съёмке}} \quad (1.1)$$

Отношение времени съёмки (STR) при этом выражается как отношение дней в классической методике к количеству дней в методике с перекрывающимся возбуждением.

$$STR = \frac{\text{Количество дней на классическую съёмку}}{\text{Количество дней на съёмку с одновременным отстрелом}} \quad (1.2)$$

Комбинирование этих двух показателей позволяет определить общую экономическую пользу использования методики с несколькими источниками:

$$\text{Производительность работ} = SDR * STR \quad (1.3)$$

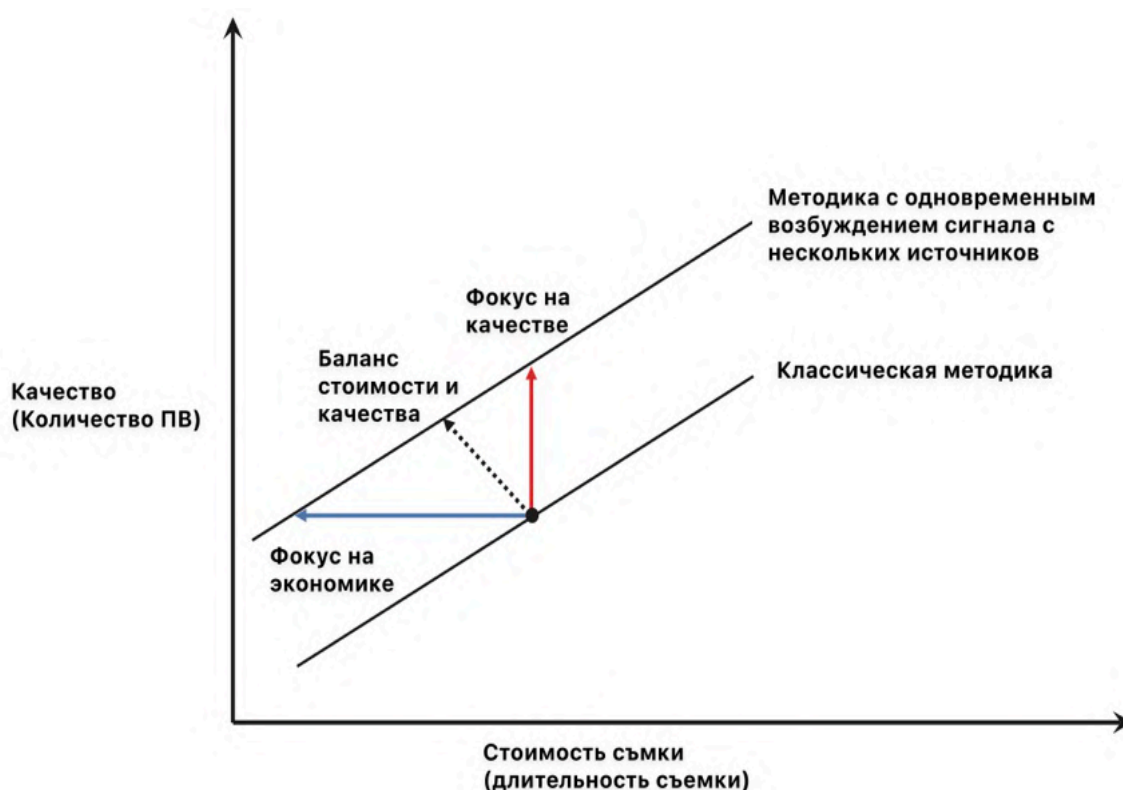


Рисунок 1.2. Схематическое сравнение стоимости и качества работ выполняемых по классической методике сейсморазведочных работ и по методике с одновременным возбуждением сигнала (Mahdad, 2012).

Таким образом методика выполнения сейсморазведочных работ с перекрывающимся возбуждением источников обладает рядом существенных преимуществ, среди которых повышение производительности, сокращение времени, и, следовательно стоимости полевых работ, повышение плотности пунктов возбуждения и качества данных. Однако ее основным недостатком является возникновение интерференции между источниками, проявляющийся в виде наложения сигналов на сейсмической записи. Для получения качественного изображения необходимо ее (интерференцию) подавлять на этапе обработки данных.

1.2. Сейсморазведочные работы с перекрывающимся возбуждением сигнала на суше

Множество различных методик с одновременным возбуждением нескольких источников предложено и разработано за последние два десятилетия. Согласно классификации, предложенной в работе (Bagaini et al., 2012), все методики можно условно разделить на две группы: независимое одновременное вибрирование (Independent Simultaneous Source, ISS) и управляемое одновременное вибрирование (Managed Simultaneous Source, MSS).

Управляемое одновременное вибрирование

Данная группа методик проведения работ включает в себя большое количество методов, многие из которых рассмотрены в работе (Жуков и др., 2022), тем не менее автор считает важным еще раз привести описание некоторых из этих методик.

Скользющий свип (slip-sweep)

Основы метода изложены в работе (Rozemond, 1996). Возбуждение колебаний следующей группой вибраторов выполняется с использованием того же свип-сигнала, в момент, когда предыдущая группа еще не завершила свою работу. При этом формируемые ими волновые поля разделены во времени за счет специального выбора интервалов (sweep time) между моментами старта каждой группы. Длительность этих интервалов выбирается таким образом, чтобы обеспечить полное освещение разреза и исключить совпадение моментов прихода целевых отражений от разных групп вибраторов, что позволяет осуществить временную селекцию корреляционных импульсов каждой группы. Таким образом происходит перекрытие между источниками, однако для каждой конкретной частоты перекрытия по времени отсутствуют. Разделение сигналов осуществляется на основе корреляции для выделения данных каждого источника. По оценкам, приведенным в (Жуков и др., 2022) максимум производительности метода может достигать 360 физических наблюдений в час при использовании четырех групп вибраторов и временном цикле отработки каждого пикета, равным 10 с. К недостаткам данного метода можно отнести проблемы с гармонической интерференцией, которые, однако, можно решить экспериментальным или расчетным путем. Несмотря на это, метод давал необходимый прирост производительности и повсеместно используется.

Динамический скользящий свип (dynamic slip-sweep)

Этот метод (Liu et al., 2014) является модификацией скользящего слипа и отличается от него наличием дополнительного параметра – дистанцией между одновременно работающими источниками. Параметры взаимозависимы: чем больше дистанция, тем меньше временной интервал, и, выше производительность. Соотношения этих характеристик выбирается с целью оптимального подавления интерференционных и гармонических помех (Жуков и др., 2022).

Одновременное вибрирование с разделением по расстоянию (distance separated simultaneous sweeping, DSSS)

Принцип данной методики (Boushka, 2010) заключается в использовании масштабных спредов сейсмических приёмников таким образом, чтобы источники были на существенной дистанции друг от друга, тем самым предотвращая интерференцию между источниками до тех пор, пока сигналы не пересекались ниже целевых горизонтов. Этот метод позволяет легко устранить интерференцию с применением мьютинга. Однако данный метод подразумевает под собой отсутствие интереса к глубоким горизонтам, что не всегда является правильным по отношению к комплексным геологическим структурам. Кроме того, он требует постоянной координации между источниками.

Вибрационная сейсморазведка повышенной надежности (high-fidelity vibratory seismic, HFVS)

Данный метод описанный (Allen et al., 1998) основан на использовании сигнала акселерометра, записанного на опорной плите и инерционной массе вибратора, что позволяет повысить достоверность данных, поскольку при таком подходе устраняется влияние кратных гармоник, изгибания опорной плиты, неоднородностей внутри излучающих групп. Оценочные силы воздействия на грунт для каждого вибратора, включающие в себя гармонические составляющие, используются для выполнения многоканальной детерминистической деконволюции одновременно зарегистрированных сейсмограмм (Bagaini et al., 2012). Однако производительность метода остается ограниченной, а операции требуют систематического контроля и синхронизации.

Другие методы группы управляемого одновременного вибрирования включают в себя (Жуков и др., 2022): метод псевдослучайных временных сдвигов (pseudorandom time delays) (Hampson et al., 2008), метод взаимно ортогональных сигналов (upsweep+downsweep) (Deluchi et al., 1987), взаимно ортогональные сигналы с переменным диапазоном частот (orthogonal vibroseis sweeps) (Xia et al., 2005), смешанный сбор данных с распределенным массивом источников (blended acquisition with dispersed source array) (Berkhout, Blacquiere, 2011), метод псевдослучайных сигналов (pseudo-random sweeps) (Zhukov et al., 2017), свип-сигналы переменной длительности (dithered sweep length) (Dean et al., 2016), каскадные свип-сигналы (cascaded sweeps) (Andersen, 1995).

Все вышеописанные методики позволяют повысить производительность полевых работ и обеспечивают сравнительно простое подавление интерференционных помех за счет контролируемых временных интервалов возбуждения источников, оптимального пространственного размещения вибраторов и точного управления параметрами свип-сигналов, что позволяет разделить данные либо во времени и в пространстве (t-x область) либо в частотной области (частотный спектр) или в фазовой области (фазовый спектр). Кроме того, эти методы

позволяют осуществлять оперативный (онлайн) контроль качества записываемых данных непосредственно в процессе съемки. Однако существует и ряд ограничений: количество одновременно действующих источников обычно ограничено, сами источники зависят друг от друга, что повышает риск возникновения задержек и остановок работ при выходе из строя одной из групп вибраторов. В дополнение эти методы требуют тщательной предварительной подготовки, координации и высокого уровня организации всех этапов полевых исследований.

Независимое одновременное вибрирование

Основное отличие данной группы методов заключается в том, что вибраторы осуществляют перемещение между точками возбуждения независимо друг от друга. Это позволяет кратно увеличить производительность работ. Основным методом данной группы является методика независимого сейсмического возбуждения сигналов (Independent Simultaneous Source Sweeping, ISS), которая рассмотрена далее.

Методика независимого сейсмического возбуждения сигналов (Independent Simultaneous Source Sweeping, ISS)

Метод впервые описан (Howe et al., 2008). Его суть в том, что каждый вибратор перемещается независимо, без синхронизации с остальными. На момент эксперимента такой режим был непревычен для операторов вибраторов, привыкших начинать свип по команде с центрального поста. Приемная сеть состояла из 10 линий, по 264 пункта приема в каждой, шаг по приемникам 30 метров, межлинейное расстояние 360 метров. Расстояние между линиями источников 90 метров, шаг ПВ на линии – 30 метров, всего 16 линий по 70 пунктов возбуждения в каждой против 4 линий с аналогичным количеством ПВ на линии классической съёмки. Для работ задействовано 8 вибраторов, каждый работал с уникальным свипом. Оценка производительности этой экспериментальной съемки показала, что метод позволяет выполнить в 4 раза больше пунктов возбуждения за половину времени классической методики съемки, где использовалась группа из четырех вибраторов для каждой точки возбуждения, то есть 2 источника. Данный подход с использованием больших групп вибраторов на тот момент был стандартным к проведению сейсморазведки так как считалось, что чем больше объем энергии источника, тем лучше качество данных. Методика ISS радикально изменила подход: кратное увеличение числа пунктов возбуждения снижает критичность качества каждого отдельного выстрела. Одновременно ISS обеспечивает более широкую азимутальность источников и высокую плотность трасс, благодаря чему полезный сигнал доминирует над интерференцией от соседних выстрелов.

В этой экспериментальной съемке интерференция между вибраторами представлена, как случайный шум так как синхронизация между временами возбуждения и позицией вибраторов отсутствовала. Непрерывная сейсмическая запись приемника состояла из нескоррелированного

сигнала и интерференции от 8 вибраторов. В один момент времени могло работать до 8 вибраторов, при этом средняя кратность возбуждения (количество одновременно работающих вибраторов для одной записи) по съемке была равна 3. Запись разделялась на отдельные выстрелы с использованием времен старта вибрирования и корректного свипа каждого вибратора для получения сейсмограмм. Использование разных свипов позволило размазать шум от интерферирующего источника. Основным методом шумоподавления являлась f -х деконволюция, стандартный метод подавления случайного шума в сейсморазведке. Шум от интерферирующего источника выглядит когерентным на сейсмограммах ОПВ, однако выглядит как случайный шум на сейсмограммах ОПП, что и позволило выполнить шумоподавление несмотря на сильный шум. Любой оставшийся шум был подавлен в процессе суммирования. Результаты шумоподавления и сравнение временных разрезов классической съемки со съёмкой ISS показаны на рисунке 1.3 и 1.4 соответственно.

Таким образом опытно-методическая съемка позволила получить результаты сравнимые по качеству с классической съемкой, но со существенно меньшими затратами. Объем данных, полученных по результатам съемки ISS, в четыре раза больше по сравнению с классической съемкой, она была выполнена в 2 раза быстрее, тем самым стоимость одной сейсмической трассы ISS составляла одну восьмую стоимости классической съёмки. Более того съемка ISS достигла лучшего качества по сравнению с классической съёмкой за счет увеличения кратности суммирования с 60 до 240. Эти результаты говорят о том, что ISS позволяет получить данные с более высокой кратностью, с лучшей разрешающей способностью по ПВ за меньшее время и меньшую стоимость.

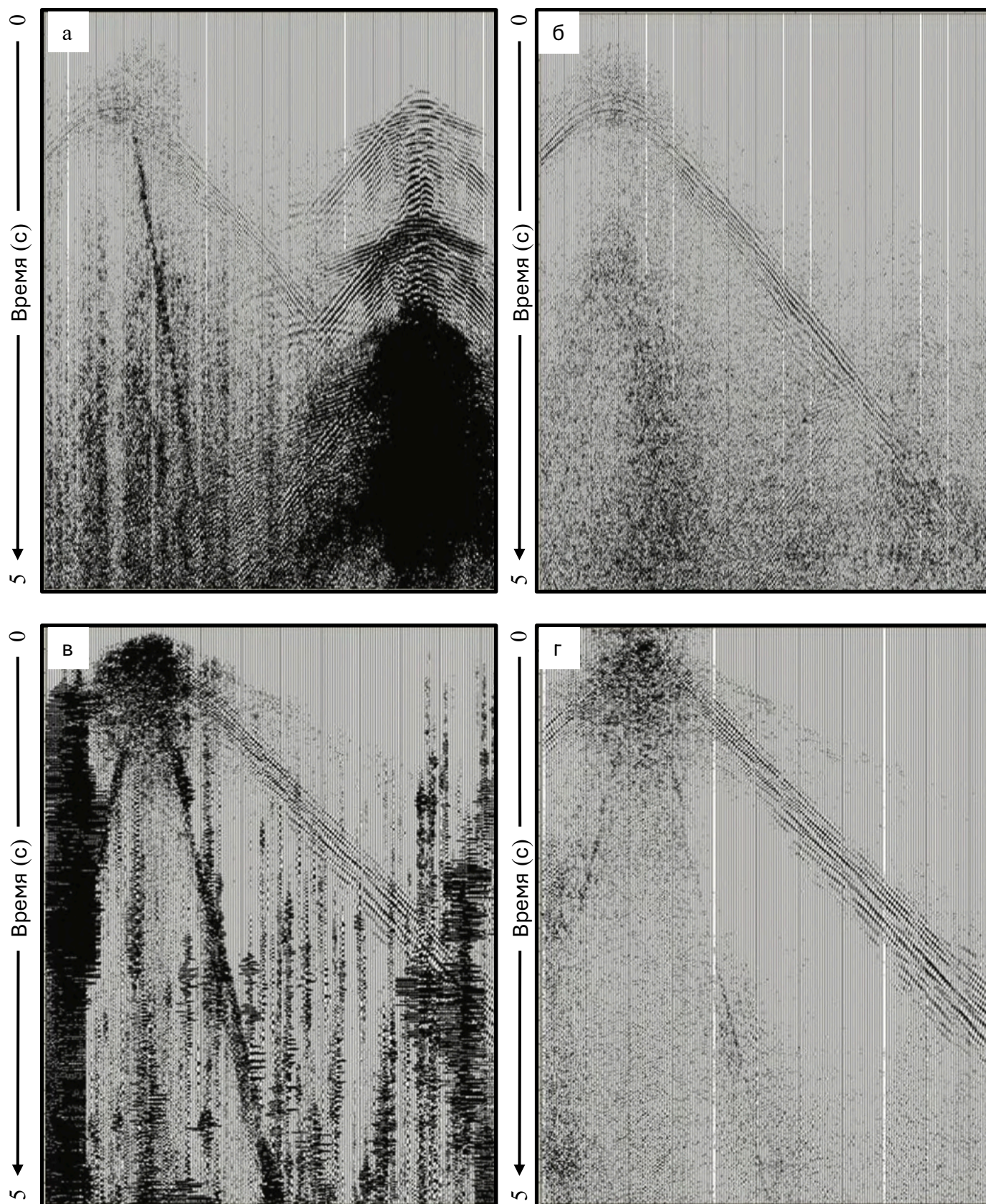


Рисунок 1.3. Сейсмограммы ОПВ (а) и ОПП (в) полученные по результатам съемки методикой ISS, (б) и (г) эти же сейсмограммы после шумоподавления FX-деконволюцией (Howe et al., 2008).

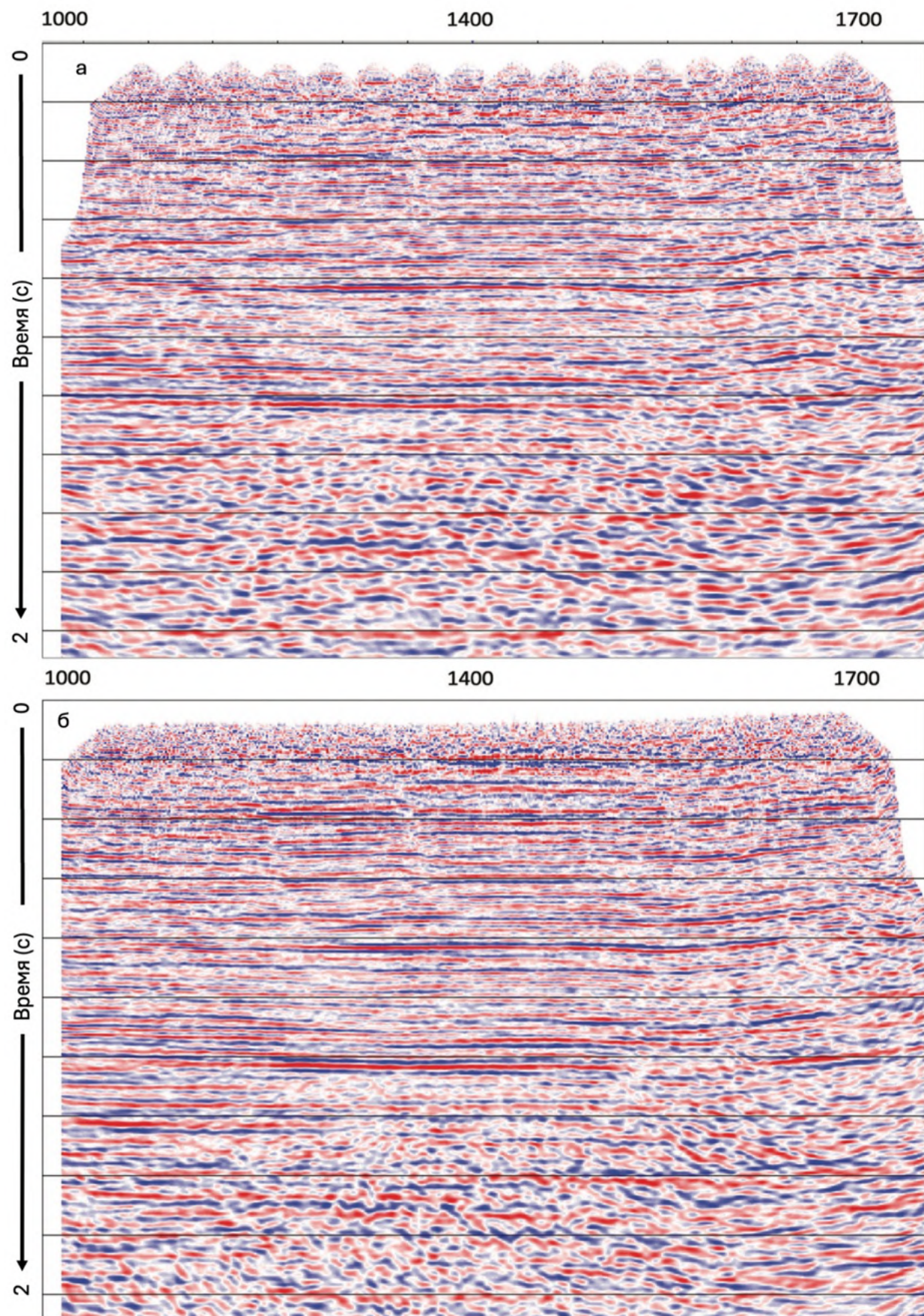


Рисунок 1.4. Временной разрез полученный по классической методике (а) с расстоянием между линиями ПВ 360 м. Временной разрез, полученный по методике ISS (б) с расстоянием между линиями ПВ 90 м (Howe et al., 2008).

Обнадеживающие результаты опытно-методических работ привели к решению о проведении полномасштабной сейсмической съемки 3D 14 000 км² методом ISS в Ливии в 2009 году (Abma, Foster, 2020). Для работ было задействовано 12 вибраторов, выполнявших возбуждение по сети 50×50 метров. С учетом этой сети удалось достигнуть плотности трасс для одного пункта ОГТ в размере 800 трасс на км² для удалений 6 км. Это около 2 миллионов трасс на один квадратный километр съёмки. Кратность этой съемки достигала нескольких сотен, что было беспрецедентно для того времени, когда съемки выполнялись с кратностью около ста. Данные цифры существенно превосходят классическую методику съемки, в которой обычно выполнялось несколько сотен точек возбуждения в сутки. Сейсморазведочные работы в Ливии показали надежность методики независимого возбуждения сигнала. Впоследствии метод ISS был неоднократно подтверждён реальными работами, в том числе в Российской Федерации (Коротков, Жуков, 2020).

Обработка данных ISS

Первоначально большая часть данных, полученных методом ISS, обрабатывалась с применением методов подавления случайного шума. Прежде всего, это связано как и с природой наземных сейсмических данных, так и с наличием необходимых инструментов обработки. Данные наземной сейсморазведки зачастую имеют большую шумовую составляющую, особенно в сравнении с данными морской сейсморазведки. Некоторое количество дополнительного шума от интерференции не так заметно, а преимущества от увеличенной плотности пунктов возбуждения, превосходят любой оставшийся шум от интерференции.

В период 2010–2020 годов разными авторами были предложены методы шумоподавления, основанные на различных вариациях медианного фильтра (Chen et al., 2014; Chen, 2015; Chen et al., 2020; Gan et al., 2016), поверхностно согласованной фильтрации (Chen et al., 2016), f-x деконволюции (Коротков, Жуков, 2020). Типичный граф обработки данными методами обычно включает в себя нарезку данных в целях получения сейсмограмм ОПВ, пересортировку в сейсмограммы ОПП и, наконец, применения процедуры шумоподавления. Данный процесс может повторяться несколько раз до получения достаточного уровня подавления шума. Однако, из-за ограничений различных методик подавления шума, таких как допущения, связанные с фильтрацией, а также ограничений при выборе параметров (тип фильтра или длины окон), часто возникает недостаточная точность разделения сигналов (Zhang, Song, 2025). В частности, когда кратность наложения сигналов (т.е. количество одновременно работающих источников) велика, а отношение сигнал/шум низкое, методы обработки, основанные на фильтрации, могут приводить как к искажению полезного сигнала, так и к проникновению шума в итоговые данные. Кроме того, эти методы требуют трудозатратного подбора параметров фильтрации и высокого уровня подготовки отдельного специалиста-обработчика сейсмических данных.

Таким образом, в индустрии существовал запрос на более продвинутые методы подавления интерференции от перекрывающихся источников. С 2011 года активно развиваются методы основанные на инверсии. Зарегистрированная непрерывная запись представляется как сумма сигналов от нескольких источников. После чего решается обратная задача, в которой исходные (несмешанные) данные подбираются так, чтобы при наложении они воспроизводили смешанные данные. Любые разрывы в записи нарушают полноту этой суммы и ухудшают обусловленность модели, усложняя расчёт, поэтому непрерывная запись является необходимым условием корректного применения инверсии. Для устойчивости решения задачи инверсии используются априорные ограничения, в частности - предположение о разреженности сигнала в определенной области. Mahdad et al., (2011) использует инверсию наименьших квадратов вместе с фильтрацией для моделирования шума от неосновного источника. Аналогичный метод предложен в работе Mahmodian et al., (2023). Другие авторы (Ibrahim, Trad, 2019; Ibrahim, Sacchi, 2014; Gong et al., 2017; Ji et al., 2019) используют редкую инверсию с различными преобразованиями Радона для разделения сигнала. Chen et al., (2018) описывает методику деблендинга с применением курвлет-преобразования в роли разреженного преобразования совместно с инверсией попеременного проецирования (Project onto convex sets). В дополнение активно применяется алгоритм инверсии порогового сжатия (Iterative Shrinkage-Thresholding Algorithm) (Beck, Teboulle, 2009; Qu et al., 2016, Abma, 2013; Kamil et al., 2021) и алгоритм спектрально-градиентной минимизации по норме L_1 (SGPL1) (Van Den Berg, Friedlander, 2009). Основные различия между методами инверсии заключаются в выборе разреженного преобразования, регуляризирующих ограничений (нормы L_0 , L_1 или L_2) и математическим алгоритмом инверсии. Исходя из анализа литературы (Qu et al. 2016; Song et al., 2019; Kumar et al., 2020; Kumar et al., 2021; Kamil et al., 2022; Jeong et al., 2022; Zhang, Song, 2025) наиболее часто встречается использование F-K преобразования в качестве разреженного совместно с математический алгоритмом FISTA минимизирующим по норме L_1 (Van Den Berg, Friedlander, 2009). По сравнению с методами разделения сигнала, основанными на фильтрации, вышеописанные инверсионные методы обеспечивают более высокую степень разделения сигнала (рисунок 1.5, рисунок 1.6). Однако вычислительные затраты на выполнение процедуры инверсии существенно выше, особенно для наземных работ. Для наземных работ максимальная кратность наложения сигнала может достигать 18 и более, в случае если для выполнения работ будет задействовано такое количество вибраторов. Вычислительные затраты на проведение процедуры инверсии пропорциональны максимальной кратности наложения (Mahdad et al., 2012), следовательно, стоимость использования инверсии для наземных работ в разы больше, чем для морской сейсморазведки, где типичная кратность наложения составляет от 2 до 4. Более того, сильно зашумлённые наземные данные могут потребовать больше итераций для достижения удовлетворительного уровня подавления сигнала. Несмотря на эти недостатки,

вычислительные мощности становятся все более доступными с каждым годом, а результаты инверсионных методов при разделении перекрывающихся сигналов являются превосходными.

Третьей группой методов для разделения сигналов от перекрывающихся источников, являются методы, основанные на машинном обучении и искусственном интеллекте. Первоначально внимание уделялось методам, основанным на обучении с учителем – supervised learning (Baardman, Hegge, 2020; Sun et al., 2020; Zu et al., 2020). Однако методы обучения с учителем требуют существенных массивов сейсмических данных без шума от интерференции и с интерференцией в роли обучающих данных, что на практике не всегда осуществимо и ограничивает применение методов обучения с учителем. В связи с этим возникает необходимость в снижении зависимости от размеченных выборок данных. Одним из решений стало использование самообучения (Chen, Wang, 2024) (self-supervised) и обучения без учителя (unsupervised learning). Альтернативный путь – использование синтетических данных для обучения (Birnie, Alkahalifah, 2022). Сначала используются синтетические данные для обучения с учителем с применением blind-spot сети, затем эти веса используются для реализации самообучающегося варианта сети. Аналогичный подход предложен (Luiken, Ravasi, 2024) для получения результата разделения перекрывающегося сигнала на синтетических данных достаточно близкого к инверсионным методам (рисунок 1.7). Тем не менее, несмотря на активные разработки, технологии машинного обучения еще далеки от полноценного внедрения в коммерческую практику разделения сигналов от перекрывающихся источников.



(а) наземная сейсморазведка с вибраторами

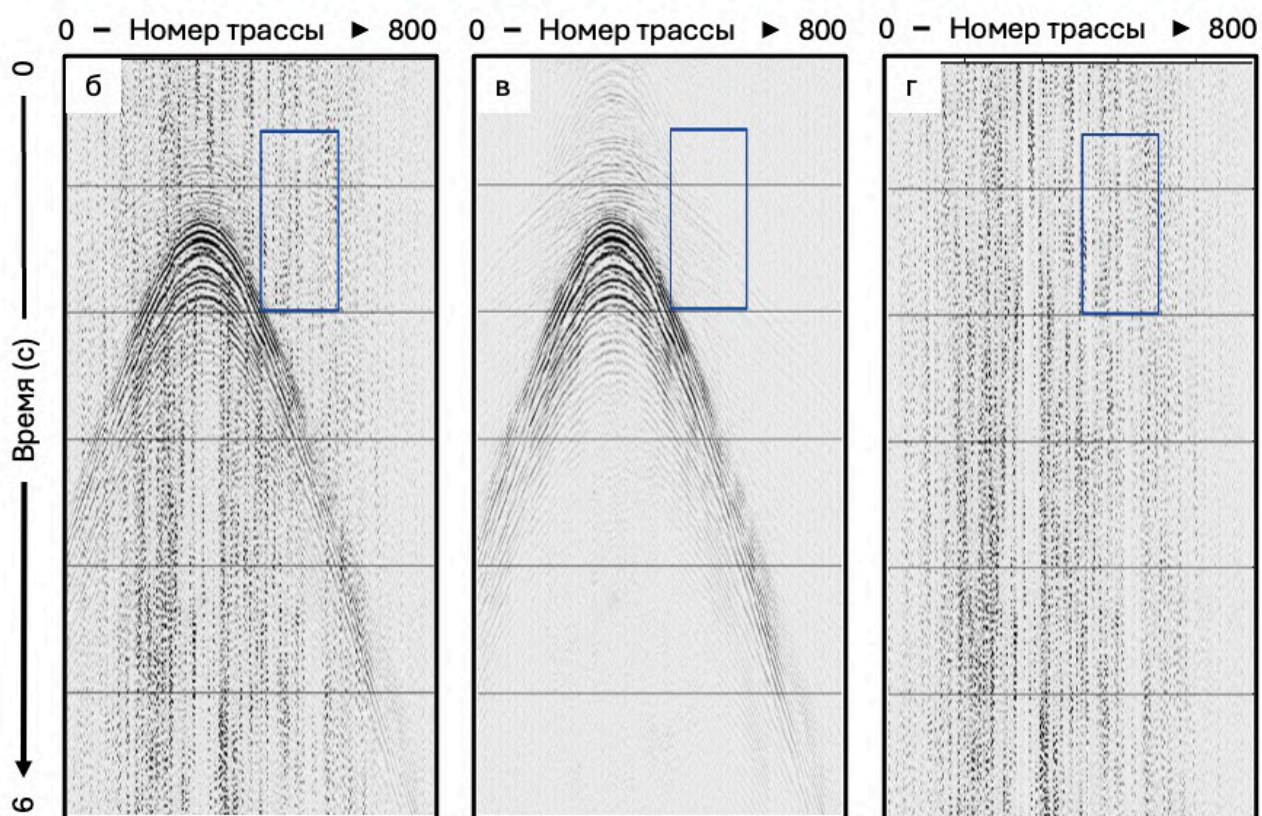


Рисунок 1.5. а – наземная сейсморазведка методикой ISS с вибраторами, б – сейсмограмма ОПП с интерференцией от других источников, в – сейсмограмма ОПП после разделения перекрывающихся сигналов с помощью инверсии, г – разница между б и в (Song et al., 2019)

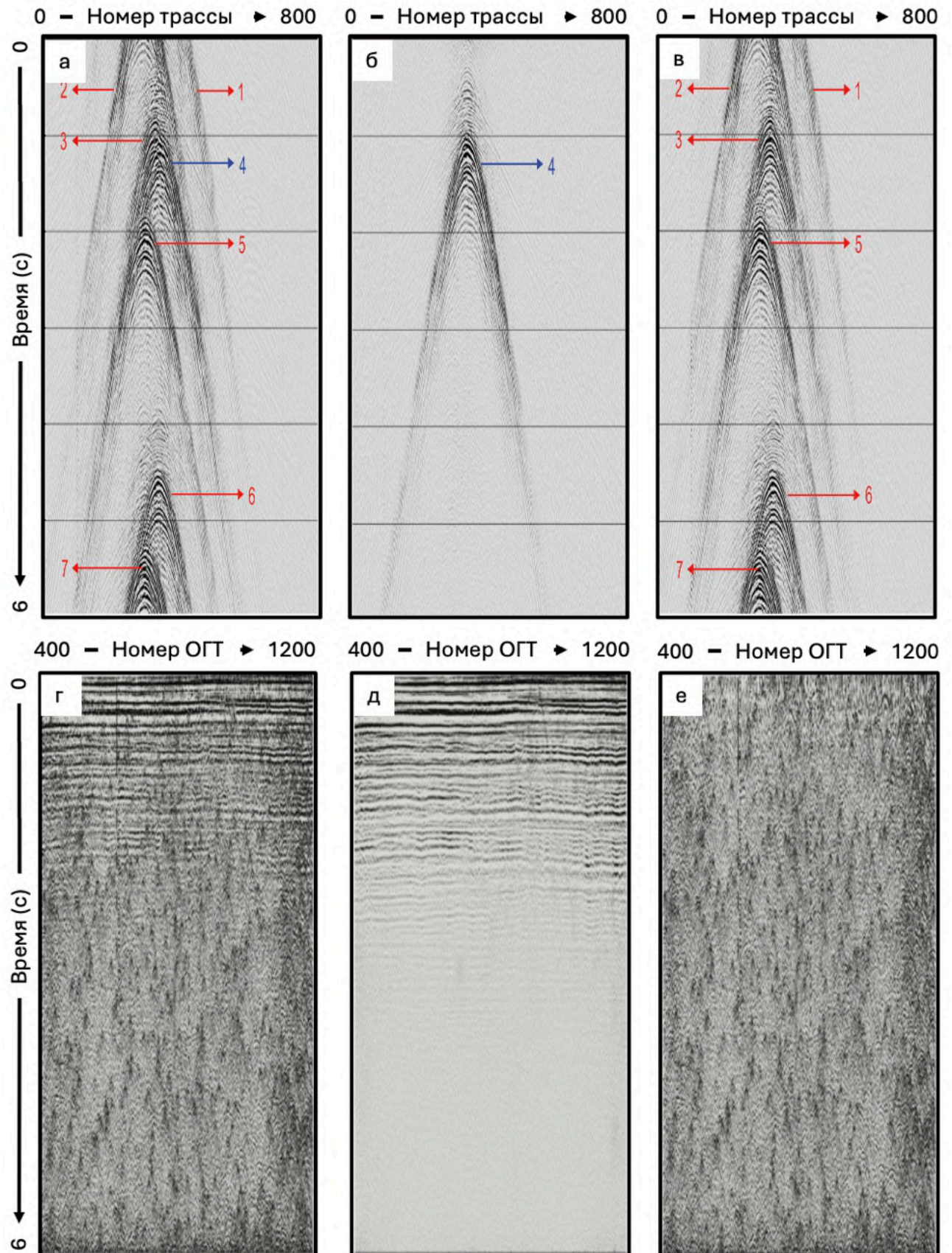


Рисунок 1.6. Результаты разделения данных с помощью инверсии. а – сейсмограмма ОПВ, на которой зафиксирован сигнал от 7 источников, б – сейсмограмма ОПВ после разделения, в – разница, г – временной разрез до разделения, д – после разделения, е - разница (Song et al.,

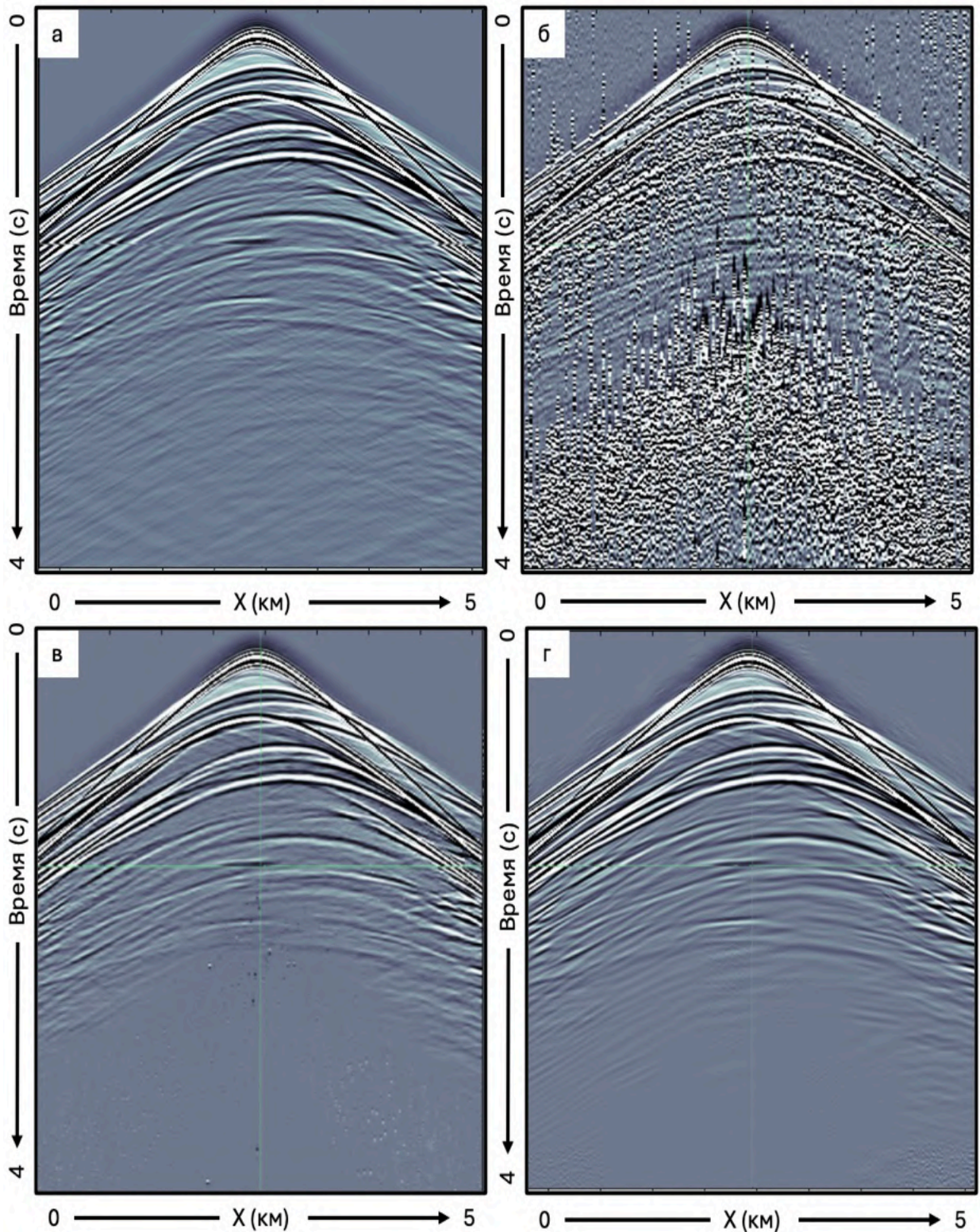


Рисунок 1.7. Результат разделения морских сейсмических данных донными косами с применением алгоритма машинного обучения. а – исходная сейсмограмма ОПП. б – синтетически смешанная сейсмограмма, смешано 4 источника. в – результат разделения с применением алгоритма машинного обучения. г – результат разделения при помощи инверсии. Результат алгоритма машинного обучения показывает снижение качества в нижней части разреза, однако отсеивают артефакт рядом с первыми вступлениями (Luiken, Ravasi; 2024)

Методические особенности проведения работ методом ISS

Метод ISS возник из осознания того, что интерференция между источниками в процессе полевой съемки является допустимой, а последующая обработка может эффективно устранять эту интерференцию и обеспечивать высокое качество данных. Это стало значительным отходом от традиционных подходов, принятых до 2008 года. Тем не менее реализация этой методики потребовала наличия соответствующих технологий как в области полевых работ, так и в области обработки данных, некоторые из которых стали практически применимы лишь в начале 2000-х годов. Некоторые из технологий, сделавшие съемку с перекрывающимися источниками на суше возможной, представлены ниже:

- Онлайн запись позиции GPS и времени выстрела каждого вибратора, что позволяет каждому вибратору выполнять свои ПВ независимо от центрального поста управления. Каждый вибратор должен иметь свою собственную GPS систему для записи точной координаты и времени возбуждения сигнала.
- Непрерывная запись сигналов приемной системой. Метод ISS требует включение регистрирующей системы до первого выстрела и остановку после последнего. Следовательно, система должна быть активной в течение многих часов, чтобы гарантировать запись абсолютно всех ПВ. Это необходимо для последующей обработки данных и подавления интерференции.
- Наличие алгоритмов подавления интерференции от перекрывающихся источников.
- Умение работать с большими объемами данных. Переход от классической методики съемки, где данные записываются по отдельным ПВ, к методике с перекрывающимися источниками, при которой запись ведется непрерывно, приводит к значительному увеличению объема данных. Этот объем возрастает еще сильнее при разделении источников на отдельные выстрелы. Например, при использовании 12 вибраторов объем данных может вырасти в 12 раз. Количество записываемых сейсмических трасс удваивается каждые 4,5 года для морских съемок и каждые 3,5 года для наземных (Monk, 2013) поэтому бурный рост объема данных остается вызовом для хранения данных и их обработки.

Помимо очевидных преимуществ у ISS есть и ограничения. Метод предполагает плотную сеть источников — это плюс для обработки и подавления интерференции, поскольку трёхмерное покрытие (по inline и crossline) позволяет надёжно восстанавливать сигнал. Но разрежение по crossline — укрупнение шага и сокращение числа ПВ — ухудшает качество разделения. Разные свипы могут частично компенсировать отсутствие третьего измерения в сетке источников, однако при одинаковых свипах или при импульсных источниках для получения данных высокого качества требуется полноценная 3D-обработка.

Кроме того, существует естественное ограничение на число одновременно работающих источников. По данным (Abma, Foster, 2020), практический верхний предел для ISS – около 40 вибраторов. Выше этого порога становится трудно поддерживать требуемую случайность времён возбуждения и независимость свипов: интервалы начинают повторяться, растёт доля когерентной интерференции, падает устойчивость инверсного разделения и возрастает риск утечек.

Выводы: сейсморазведка с перекрывающимися источниками на суше

Методы наземной сейсморазведки с применением перекрывающихся источников активно развиваются на протяжении последних 20 лет. Методики, основанные на управляемом одновременном вибрировании эффективны, однако в сравнение с методом ISS дают меньший прирост производительности, что не мешает им быть активно применяемым, особенно при благоприятных (для конкретного метода) условий проведения съемки. Применение методов независимого возбуждения сигналов, в частности ISS, для проведения наземной 3D сейсморазведки с использованием автономных приемников (нод) стало настоящим прорывом. Это методика позволяет существенно сократить время, необходимое для съемки фиксированной площади, что снижает затраты, а также уменьшает риски для здоровья и безопасности персонала. Одновременно ISS дает возможность собирать данные с более высокой плотностью, что улучшает качество сейсмических изображений, как до, так и после суммирования, а также повышает точность вычисления атрибутов. Это приводит к улучшению всех аспектов сейсмического моделирования и интерпретации. На данный момент метод ISS является признанным стандартом для выполнения крупных наземных съемок. Одновременно съемка с независимыми источниками и автономными приемниками – это быстрее, дешевле, безопаснее и качественнее. Немногие технологические инновации оказываются столь универсально успешными.

1.3. Сейсморазведочные работы с перекрывающимся возбуждением сигнала на шельфе

Современные морские сейсмические съемки

Морская сейсморазведка включает в себе несколько основных методов работ, которые применяются в зависимости от поставленной геологической задачи. Морская сейсморазведка 2D с косой (рисунок. 1.8а) подразумевает под собой использование одного судна, которое тянет за собой один кабель с приемниками (гидрофонами) длиной от 8 до 12 километров и один массив источников. Когда 3D-съёмки (рисунок. 1.8б) набрали популярность, суда начали тянуть за собой от 8 и более кос длиной от 8 до 10 километров. Для предоставления возможности судну проходить две линии возбуждения за один проход по профилю стали использовать два массива источников. До момента появления методики с перекрывающимся возбуждением на море использование двух массивов источников являлось стандартом.

В морской сейсморазведке обычно используются гидрофоны вместо геофонов. Устройство геофона основано на катушке и проводе, обернутых вокруг магнита, и измеряющих скорость колебаний, тогда как гидрофоны регистрируют давление с помощью пьезоэлектрического элемента, который генерирует электрический заряд, пропорциональный давлению. Некоторые современные морские косы содержат как гидрофоны, так и геофоны поскольку совмещение данных от обоих типов датчиков помогает подавлять кратные отражения. Приемники на морских донных станциях (нодах) часто оснащаются и гидрофонами, и трехкомпонентными геофонами, что позволяет проводить многокомпонентный анализ сейсмических данных.

В большинстве морских сейсмических исследований в качестве источников используются пневмоисточники, зарекомендовавшие себя как надежные и гибкие сейсмические источники. Они безопаснее устаревших взрывчатых источников, надежнее старых газовых пушек и мощнее электрических искровых источников. Каждый пневмоисточник содержит резервуар со сжатым воздухом и клапан, через который воздух выбрасывается при команде с судна, создавая пузырь в воде. Несмотря на то, что одиночный пневмоисточник генерирует сравнительно слабый сигнал, массив, срабатывающий одновременно, может создать очень мощный импульс.

Как упоминалось ранее, буксируемые косы по-прежнему остаются самым распространённым типом морской сейсмической съемки, однако съемки с донными приемниками (ocean-bottom survey, OBN) стали широко применяемой альтернативой. В таких съемках приемники размещаются на морском дне, а судно-источник производит возбуждение сигналов. Хотя такие съемки, как правило, дороже и медленнее в сравнении с методами с буксируемыми косами, они упрощают проведение работ в зонах с существующей инфраструктурой, а также активно используются при 4D (мониторинговых) съемках. Кроме того, они позволяют поручать широкоазимутальное покрытие в поперечном (crossline) направлении,

поскольку приемники остаются неподвижными, а суда формируют необходимую сетку пунктов возбуждения. За счет стационарности приемников геометрия таких морских съемок во многом напоминает наземные сейсмические исследования. В дополнение донное оборудование способно регистрировать 3 ортогональные компоненты геофона и S волны (против одной компоненты и P волн у сейсмических кос), что кратно увеличивает объем получаемых данных, и, следовательно качество итогового сейсмического изображения.

Существует два типа сейсмических съемок с донным размещением приемников. Первый тип – это съемка с использованием донных кос (OBC, Ocean-Bottom Cable), при которой кабеля с встроенными датчиками укладываются на дно. Второй тип – съемка с использованием донных станций (OBN, Ocean-Bottom Node), где применяются независимые станции, содержащие в себе как сами приемники, так и электронику для хранения записанных данных. Эти станции размещаются на дне без подключения к поверхности. Изначально одним из основных недостатков технологии OBN считалось отсутствие возможности контролировать записываемые данные в режиме реального времени. Однако со временем донные станции доказали свою надежность, и сейсмическое сообщество приняло данный подход. Для работы на больших глубинах или в зонах с большим количеством донной инфраструктуры, например, вблизи добывающих платформ используется дистанционно управляемый подводный аппарат (ROV) для установки донных станций. В мелководных районах донные станции можно привязать к канату и сбрасывать на дно, что делает процесс спуска и подъема станций гораздо быстрее. В результате создается геометрия съемки, очень похожая на наземную систему.

Процесс проведения сейсморазведочных работ с донными станциями выглядит следующим образом. Сначала (рисунок 1.9 а,б) суда-раскладчики проходят вдоль приемных линий, спуская на дно донные станции. После чего судно-пингеровщик (рисунок 1.9 в,г) проходит по приемным линиям и проверяет соответствие положения донных станций на дне с проектными координатами с помощью гидроакустической системы. Наконец, источник производит отстрел линий возбуждения (рисунок 1.9 д,е). Процесс повторяется до выполнения всего объема сейсмической съемки.

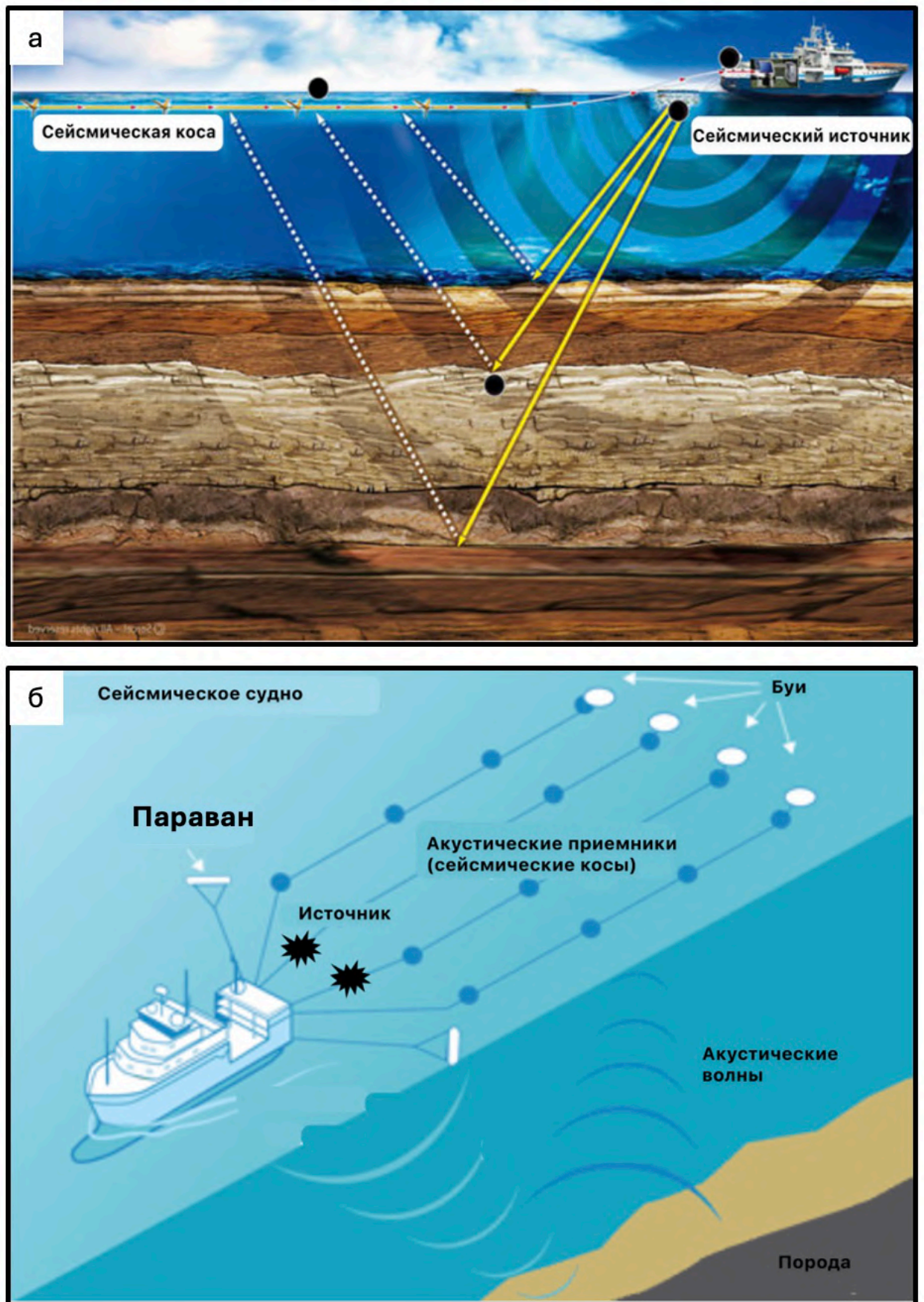


Рисунок 1.8. Процесс выполнения сейсмической съемки 2D – а. Процесс выполнения сейсмической съемки 3D – б.

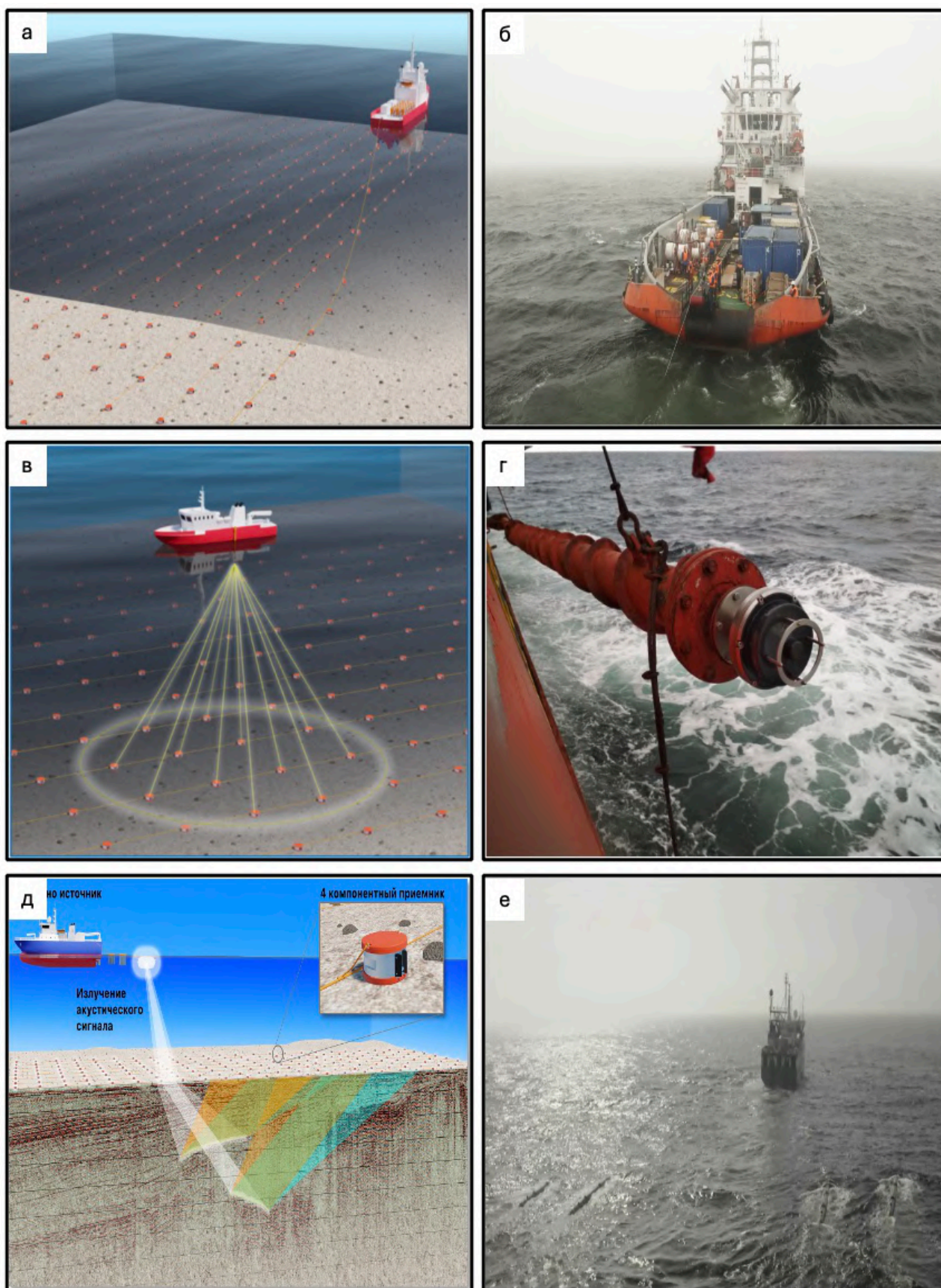


Рисунок 1.9. Проведение сейсмической съемки 3D с донными станциями. а, б – процесс раскладки донных станций с судна-раскладчика. в, г – пингеровка (уточнение позиции) донных станций на дне с помощью гидроакустической антенны. д, е – процесс отстрела приемных линий судном-источником (Источник – архив АО «МАГЭ»)

Отличия в методике проведения сейсморазведочных работ на суше и в море

Развитие в морской сейсморазведке, хотя и было продиктовано экономическими соображениями, в большей степени определялось влиянием идей в области обработки сигналов и разреженной инверсии, и изначально продвигалось с математической и вычислительной точки зрения. Несмотря на то, что методики 3D-сейсморазведки с буксируемыми косами и перекрывающимися источниками вызывали интерес (Abma, Foster, 2020), ранние результаты рассматривались как компромисс между качеством и эффективностью. Такой компромисс не получил широкого распространения в индустрии, особенно учитывая высокие требования к качеству морских данных, необходимых для точного анализа амплитуд до суммирования (pre-stack AVO). Тем не менее, успех наземных работ методом ISS сподвиг индустрию на первые опытно-методические работы на шельфе в 2012 году (Abma et al., 2012).

По сравнению с наземными съемками, внедрение методики перекрывающегося возбуждения в морской сейсморазведке оказалось менее сложной инженерной задачей. Судачисточники уже были оснащены высокоточной GPS-навигацией и системами синхронизации. Перевод донных кос и кабельных систем на непрерывную запись потребовал некоторых усилий, но не представлял серьёзной сложности. Морские донные станции изначально работали в режиме непрерывной записи.

Одно из ключевых различий между наземной и морской методиками является случайность времен возбуждений сигнала, обеспечение которой является необходимым условием создания некогерентной картины возникающей интерференции. В морских съемках интервалы между выстрелами, как правило, более регулярны, тогда как в наземных работах естественная нерегулярность возникает из-за различий во времени перемещения вибраторов между точками вибрирования, а также из-за человеческого фактора при их запуске. На шельфе естественные факторы - погода, течения, ветер - вызывают лишь небольшие колебания скорости судна и, как следствие, смещения времени между последовательными выстрелами. Такая «естественная случайность» нередко недостаточна и не обеспечивает требуемых задержек; более того, эти колебания могут быть регулярными (Abma, Foster, 2020). Следовательно, необходимо искусственно вводить случайность во времена возбуждений для обеспечения некогерентности интерференции. Это делается путем аппаратного внедрения случайных задержек во времена выстрелов в систему управления возбуждением на судне. До начала полевых работ создается таблица на основе случайного распределения, где задается задержка для каждого пункта возбуждения (Abma, 2014). Теоретически доказано (Jiang, Abma, 2010), что для эффективного разделения сигналов необходим диапазон случайных задержек, сопоставимый с периодом нижней рабочей частоты записи: минимально – не менее половины периода, то есть порядка ± 0.25 с при $f_{min} \approx 2$ Гц, а оптимально до ± 1 с для надежного создания некогерентной картины

интерференции. Увеличение задержки более ± 1 с уже начинает влиять на процесс проведения полевых работ, смещения от проектных ПВ становятся существенными, что приводит к изменению геометрии работ. На практике задержки выбирают из равномерного (или обрезанного нормального) распределения в интервале от $\pm 0.25 \dots \pm 1$ с (рисунок 1.11), задают независимо для каждого ПВ и каждого судна, кратно шагу дискретизации. Дополнительно требуется исключать периодичность: не допускать повторяющихся шаблонов по линиям возбуждения (в обоих направлениях), периодически регенерировать последовательности. Контроль качества задержек выполняется до полевых работ, и по их завершении: анализируются гistogramмы времён возбуждений и по фактическим данным оценивается степень некогерентности интерференции. Более подробно этот вопрос рассматривается в разделе 2.5.

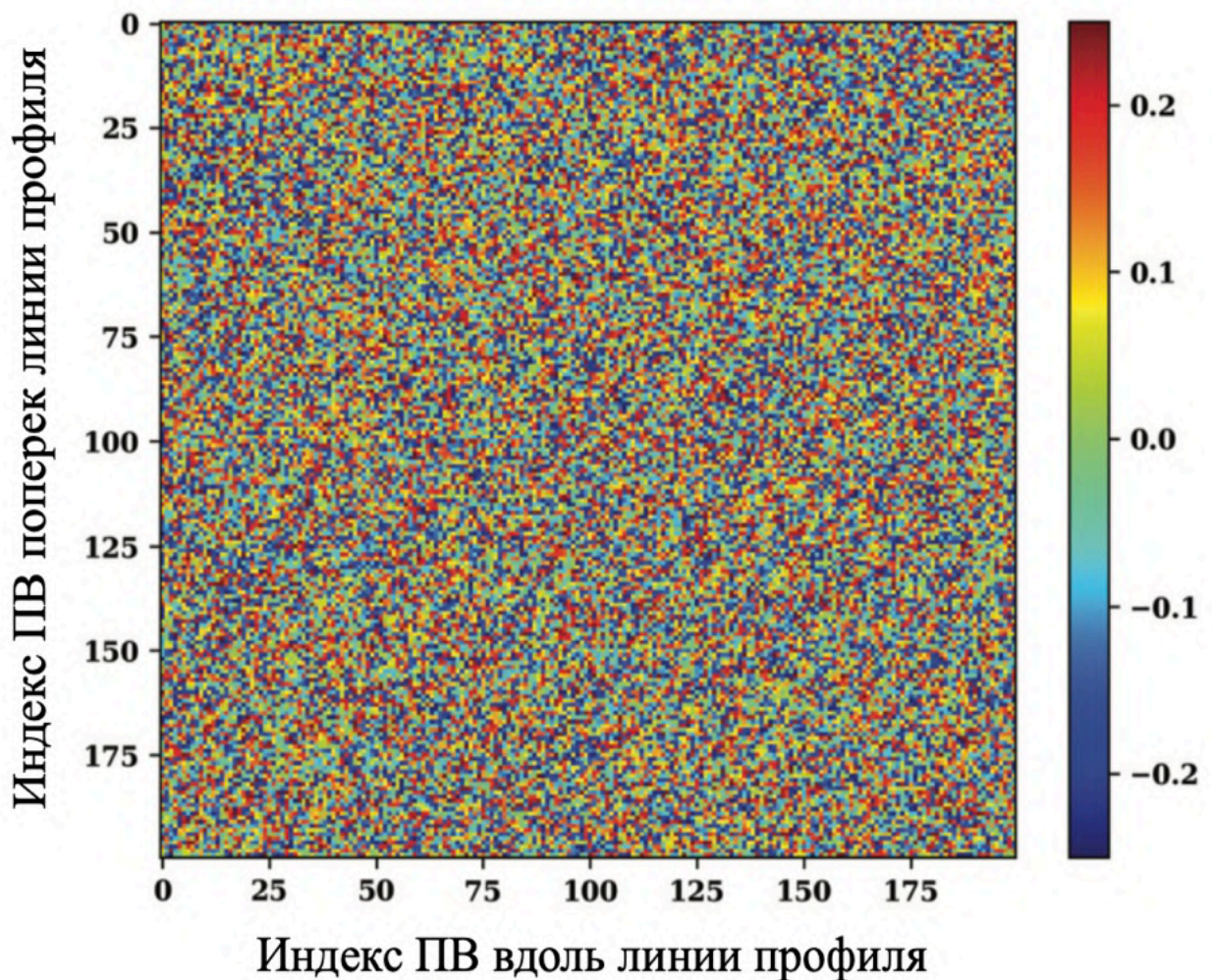


Рисунок 1.11. Пример таблицы случайных чисел, используемой для введения программируемой задержки на основе равномерного распределения с нижней границей -0.25 с, верхней $+0.25$ с (Abma, 2014)

Другой особенностью морских съемок с перекрывающимися источниками является ее ограниченная применимость для 3D сейсморазведки с буксируемыми косами и невозможность применения в 2D сейсморазведке. Разделение источников в условиях двумерных данных остается сложной задачей, и текущие методы обработки не позволяют достигнуть качества сравнимого с классической съемкой. В свою очередь известны примеры использования трех и пяти перекрывающихся источников в 3D сейсморазведке с косами (Aaron et al., 2016; Hager et al., 2016; Langhammer et al., 2018; Widmaier et al., 2021), при которых разделение перекрывающихся выстрелов выполняется с помощью многомерных итерационных методик фильтрации в различных областях. Несмотря на это в 3D сейсморазведке с косами метод с перекрывающимися источниками не нашел широкомасштабного применения из-за сложностей с обработкой и высоким требованиям к судам: количество судов, которые могут буксировать 3-5 линий источников и иметь большое количество линий сейсмических кос (12 и более) существенно ограничено.

Главным преимуществом внедрения съемок с перекрывающимися источниками для съемок с донным оборудованием стало то, что геометрия этих морских съемок очень похожа на наземные съемки ISS. Поскольку приемники остаются неподвижными, имеется достаточно времени для формирования плотной сети источников. Более того, при съёмке с донными станциями на больших глубинах высокая стоимость раскладки таких станций с помощью ТНПА ограничивает их (станций) количество, что приводит к редкой сети расположения станций на дне. Недостаточная плотность приемников компенсировалась увеличением плотности источников, что позволяет получать качественные сейсмические изображения даже при разреженной сетке приемников.

Существуют и другие различия между наземными и морскими съемками с перекрывающимися источниками, связанные непосредственно с источниками. Как правило, морские суда-источники – это высокотехнологические и дорогостоящие суда. На рисунке 1.10 показана зависимость между стоимостью съемки с донными станциями и количеством судов-источников (Abma, Foster, 2020). Использование двух судов позволяет снизить стоимость съемки примерно на 40 %, то есть почти вдвое. Добавление третьего судна снижает затраты дополнительно лишь на 10 %. Введение четвертого судна практически не влияет на стоимость съемки, а добавление пятого, наоборот ее увеличивает. Кроме того, существует естественное ограничение на количество доступных-судов источников. В некоторых случаях даже найти одно судно представляет проблему, а обеспечение двух становится настоящим вызовом.

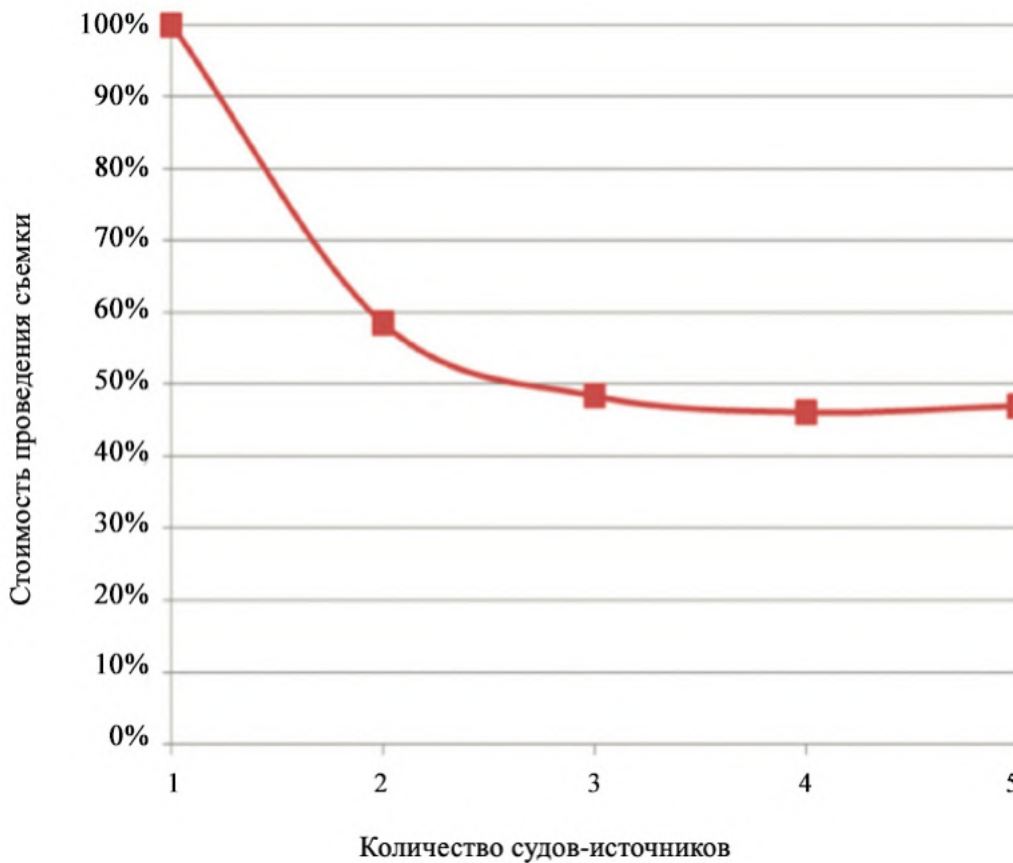


Рисунок 1.10. Влияние количества судов-источников на стоимость сейсмической съемки с донными станциями (Abma, Foster, 2020).

В свою очередь обработка наземных данных ISS, несмотря на ее эффективность при полевых работах, может быть значительно более ресурсоемкой по сравнению с аналогичной морской съемкой. В морских условиях существует естественное ограничение на количество одновременно работающих источников, так как типичное судно-источник оборудовано двумя источниками, при этом некоторые специально-модифицированные суда имеют три источника, следовательно, кратность смешивания (количество одновременно активных источников) обычно ограничена двумя – четырьмя. В типичной наземной съемке одновременно работают три-четыре вибратора. Однако бывают моменты, когда активно и большее число вибраторов, и кратность смешивания возрастает и может достигать 12 и более. Как показано в работе (Mahdad et al., 2012) стоимость разделения сигналов инверсионными методами пропорциональна кратности смешивания. Кроме того, на вычислительные затраты при обработке данных влияет случайный шум. Данные наземной сейсморазведки, как правило, имеют больше шума, чем морские, что влияет на скорость сходимости алгоритма инверсии и может повысить затраты в 4 раза и более (Mahdad et al., 2012). Таким образом разделение перекрывающихся источников на море, в общем случае, требует меньших вычислительных затрат по сравнению с наземными данными.

Примеры сейсмических съемок с перекрывающимся возбуждением на море

После успешных опытно-методических работ с перекрывающимися источниками на море в 2009 году в Мексиканском заливе и в 2012 году в Северном море компания ВР решила провести первую масштабную съемку с применением донного оборудования и с перекрывающимся отстрелом на шельфе Тринидад и Тобаго в 2014 году (Abma, Foster, 2020). Была использована сетка ПВ 50x50 метров, а сетка ПП состояла из донных кос с расстоянием 25 метров между приемниками, и 300 метров между линиями. Съемка покрывала 1000 км² и потребовала 13 месяцев на выполнение. Плотность трасс составляла 5,2 миллиона трасс на км².

Для сравнения данных классической съемки и съемки с перекрывающимися источниками было принято решение, что один из патчей будет сделан повторно, с классическим возбуждением сигнала, без перекрытия. На рисунке 1.11 показано сравнение временных разрезов и амплитудных слайсов, полученных по результатам классической и ISS съемки. Как видно, существенных различий между ними не выявлено. Аналогичные результаты наблюдаются и на разрезах анализа AVO (Abma, Foster, 2020). В дополнение к этому результаты съемки ISS значительно превосходят результаты, полученные ранее с буксируемыми косами.

Таким образом методика ISS на море доказала свою состоятельность и начала активно применяться в практике сейсморазведочных съемок. Более того, развитие инверсионных подходов к подавлению интерференции позволило получать данные в таком виде, как если бы они были получены классической съемкой. На рисунке 1.12 показаны примеры разделения источников во время проведения съемки в Мексиканском заливе (Kumar et al., 2021). В первой съемке было использовано три судна-источника, каждое из которых буксировало за собой по два источника в режиме «флип-флоп». Наибольшая интерференция проявляется от источника того же судна и возникает в районе прямой волны, тогда как интерференция от двух других судов проявляется случайным образом и распределена в пространственно-временной области. Сильная помеха накладывается на сильный когерентный сигнал (эффект “сильное-на-сильное”), а слабая на слабый сигнал (эффект “слабое-на-слабое”). Во втором случае было задействовано уже два судна, но с тремя источниками каждый в режиме «флип-флоп-флап», что позволяло за один проход судна выполнять три проектных линии возбуждения. Использование этой схемы создает дополнительные сложности. Интерференционный шум от двух других источников этого же судна проявляется в виде сжатой гиперболической зоны периодически каждые ~6.67 секунды (рисунок 1.12б). Более того интерференция от другого судна распределена не случайно, что приводит к появлению когерентных участков интерференции по всей записи. Такие типы интерференционные шумов известны как феномен “сильное-на-слабое”.

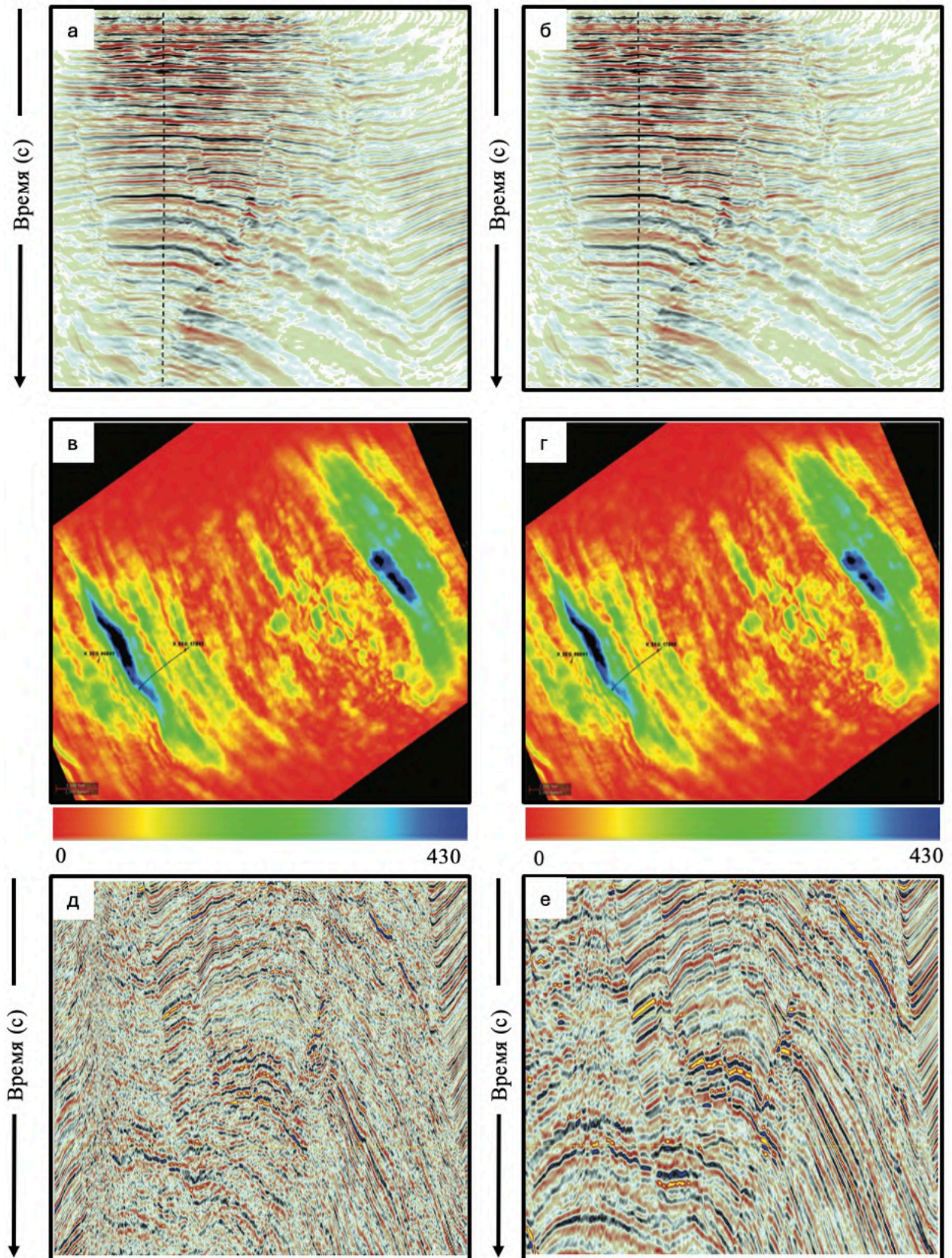
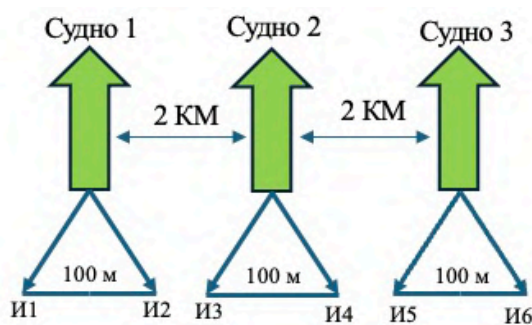


Рисунок 1.11. Сравнение классической методики съемки и методики ISS на море. а – временной разрез, полученный по классической методике, б – временной разрез, полученный с помощью ISS, в – временной слайс амплитуд по классической методике, г – по методике ISS. д – временной разрез полученный по результатам 3D работ с косами, е – временной разрез ISS

Характер интерференционного шума – “сильное-на-сильное”, “слабое-на-слабое” или “сильное-на-слабое” определяет сложность задачи подавления интерференции. Особой сложностью является ситуация “сильное-на-слабое”, при которой динамический диапазон интерференционного шума значительно превышает уровень сигнала. В этом случае сильно выраженная интерференция в преобразованном для инверсии пространстве остается более выраженной по сравнению со слабым сигналом, что ведет к вероятности выбора когерентной компоненты шума вместо слабого сигнала на ранних итерациях инверсии. При таком типе интерференции было предложено (Kumar et al., 2021) использовать инверсию итеративно с использованием априорной информации о скорости событий. На первом этапе инверсия выполняется со скоростями прямой волны и связанного с ней интерференционного шума. Затем используются данные о скорости отражений, а в завершении происходит инверсия без введения поправок скорости. Таким образом процесс является более вычислительно затратным, но вполне выполнимым. Результаты применения такой, многослойной инверсии показаны на рисунке 1.12.

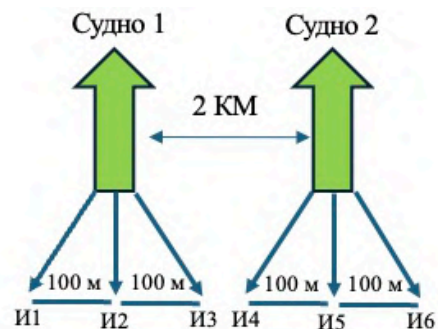
1.4. Выводы к главе 1

1. Методика проведения съемки ISS с перекрывающимся возбуждением сигнала напрямую решает ключевую дилемму – соотношение качества, скорости и сроков проведения работ, позволяя повышать плотность по источнику и (или) сокращать календарные сроки при сопоставимом качестве по сравнению с классической методикой съемки.
2. Методы подавления интерференции: фильтрационные схемы подавления шума дают ограниченное качество и чувствительны к настройке; инверсионные методы с разреженными представлениями сигнала обеспечивают чистое разделение и сохранения сигнала, несмотря на вычислительную дороговизну и необходимость наличия непрерывной записи; методы, основанные на машинном обучении, еще развиваются, однако в производственной практике пока не используются.
3. На шельфе съемку с перекрывающимися источниками более эффективно внедрять совместно с применением донных кос или станций. Для сейсмических кос из-за ограниченного количества кросслайнов разделение сложнее, а масштабное применение ограничено.
4. Ключевым отличием морских и наземных (ISS) съёмок с перекрывающимися источниками является необходимость введения случайных задержек между выстрелами на шельфе для создания некогерентной картины интерференции.



Методика отстрела:

- (И1,И2),(И3,И4) и (И5,И6) стреляют двумя источниками поочередно каждые 50 м
- Случайная задержка ± 1 сек
- Независимое друг от друга движение судов



Методика отстрела:

- (И1,И2,И3) и (И4,И5,И6) стреляют тремя источниками поочередно каждые 16,66 м
- Случайная задержка ± 1 сек
- Независимое друг от друга движение судов

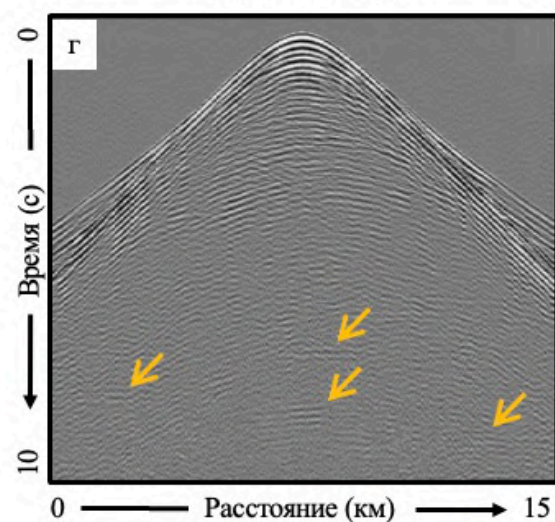
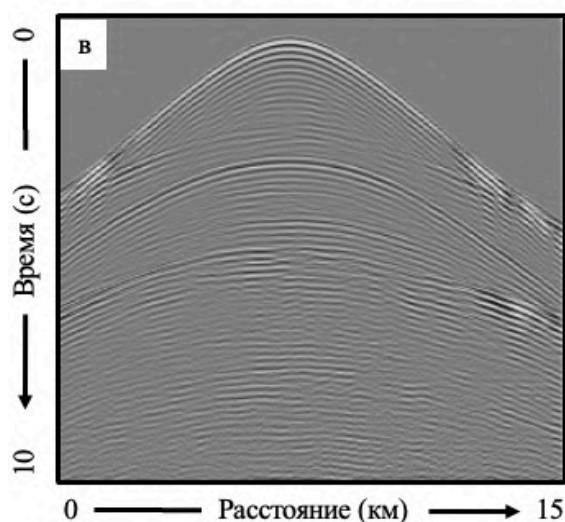
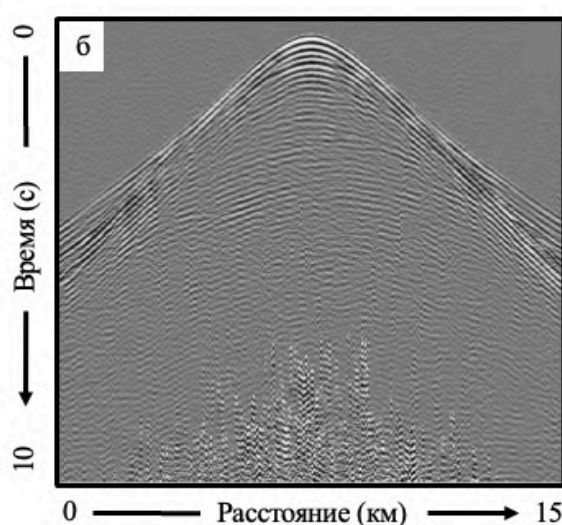
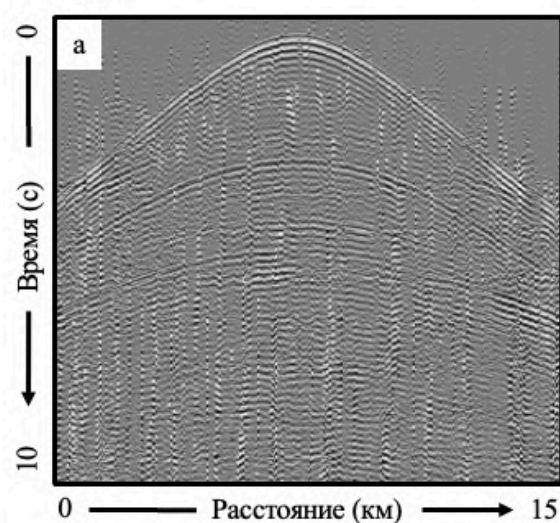


Рисунок 1.12. Разделение сигналов от перекрывающихся источников с применением инверсии.

Сверху конфигурация судов-источников. а,б – соответствующие сейсмограммы ОПП.

в,г – сейсмограммы после подавления интерференции с помощью инверсии.

Глава 2. Разработка алгоритма разделения сигналов от перекрывающихся источников на основе инверсии³

2.1. Матричная модель сейсмических данных

Berkhout (1982) продемонстрировал, что сейсмические данные могут быть представлены в виде матрицы P . Сигнал, сгенерированный в положении источника x_s , измеряется в положении приемника x_r , как функция времени t , что позволяет представить данные в виде трехмерного куба $p(t, x_s, x_r)$ (рисунок 2.1а). После применения преобразования Фурье по времени каждый частотный срез нового куба представляет собой матрицу данных $P(x_r, x_s)$ (рисунок 2.1б), то есть для каждой частотной компоненты существует своя матрица данных.

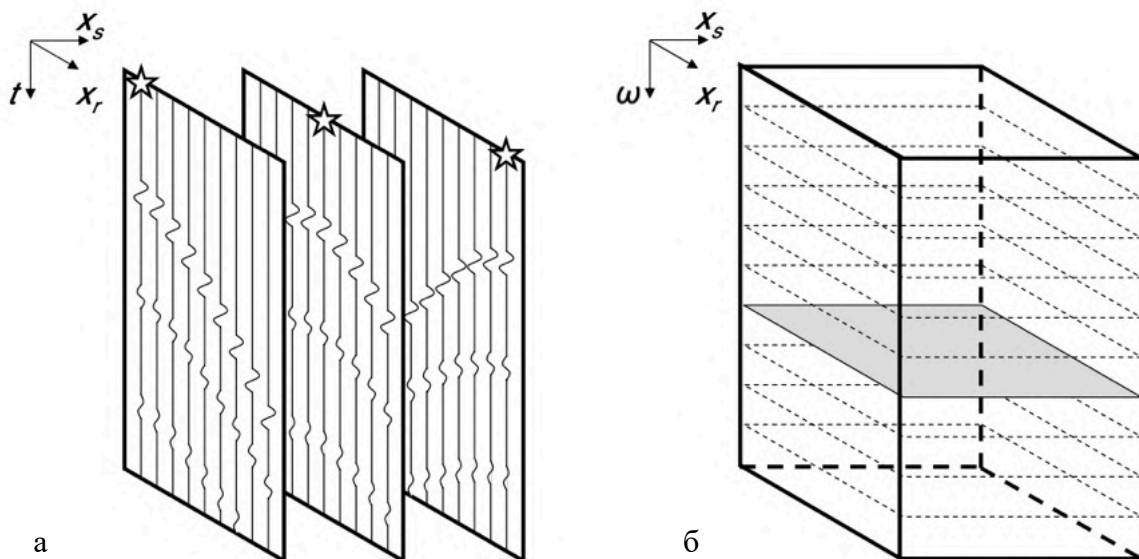


Рисунок 2.1. Иллюстрация матрицы данных P . а - сигнал, сгенерированный в точке возбуждения x_s , измеряемый в точке приема x_r , как функция времени t ; б - куб справа равен кубу слева после преобразования Фурье, где каждый срез по частоте является матрицей данных P (Van Groenestijn, 2010)

В матрице P (рисунок 2.2) каждый столбец представляет собой сейсмограмму ОПВ, каждая строка - сейсмограмму ОПП, каждая диагональ - сейсмограмму общих удалений, а антидиагональ - сейсмограмму общей глубинной точки. Согласно прямой сейсмической модели (Berkhout, 1982), матрица данных P может быть представлена как умножение матрицы источника S , матрицы импульсной характеристики земли X , и матрицы приемников D .

³При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ отражены основные результаты, положения и выводы исследования: Казанин Г.А., Гайнанов В.Г., Базилевич С.О. Влияние случайной задержки между возбуждением сигналов при перекрывающимся отстреле на характер наблюдаемого шума // Приборы и системы разведочной геофизики № 4 (83). 2024 С. 72–81. EDN: AZUMPU (1,16 п.л., вклад автора 60 %) Импакт-фактор 0,056 (РИНЦ)

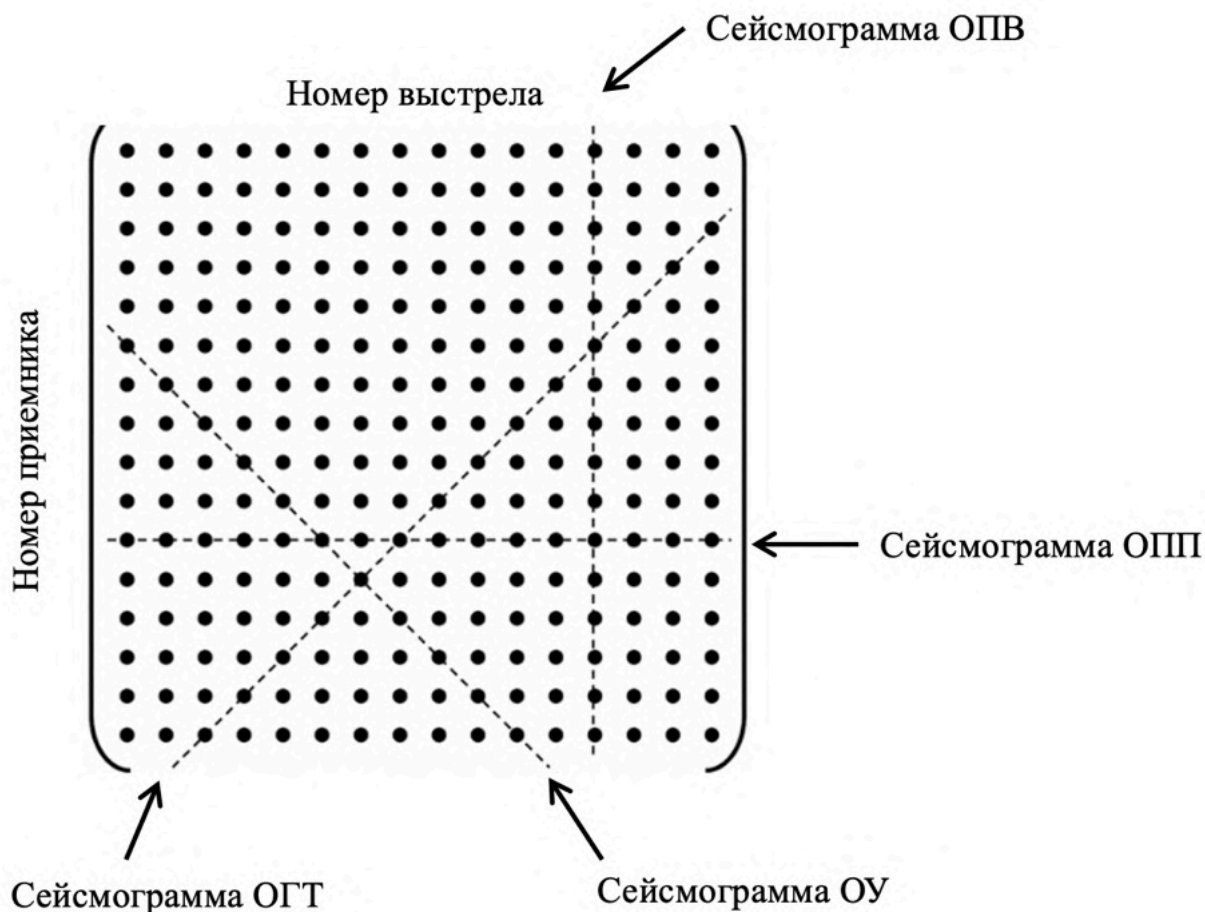


Рисунок 2.2. Иллюстрация матрицы данных P (Mahdad, 2012)

$$P = DXS \quad (2.1)$$

В матрице источника S , ряды и колонки представляют собой координаты выстрела, таким образом S диагональная матрица. Каждый диагональный элемент матрицы s_{ii} захватывает одну частотную компоненту сигнатуры источника в точке $x_s = x_i$. При применении преобразования Фурье ко всем частотным компонентам s_{ii} можно получить сигнатуру источника как функцию времени.

Импульсная характеристика земли X описывает, как импульс, созданный в точке расположения источника x_s , преобразуется в земной среде в сигнал, регистрируемый в точке расположения приемника x_r .

Матрица приемника D преобразует сейсмическое волновое поле в точке расположения приемника x_r в записанный сигнал. Это преобразование включает в себя добавление госта источника.

На практике пытаются получить неизвестный отклик земли X , исключая влияние приемника и источника.

2.2. Представление сейсмических данных при перекрывающемся возбуждении нескольких источников

При выполнении сейсмических работ с перекрывающимися источниками события от одновременных выстрелов пересекаются и создают интерференцию сигнала, то есть сигналы смешиваются. Процесс смешивания источников может быть представлен с помощью введения матрицы смешивания Γ , которая преобразуют матрицу источника S в матрицу смешанных источников $S_{\text{смеш}}$.

$$S_{\text{смеш}} = S\Gamma \quad (2.2)$$

На рисунке 2.3 продемонстрирована структура матрицы $S_{\text{смеш}}$ и Γ , каждая строка матрицы Γ соответствует одной позиции источника, а каждый столбец - одному эксперименту с перекрывающимся возбуждением. Матрица смешивания ($S_{\text{смеш}}$) описывает физику проведения сейсморазведки с перекрывающимися источниками следующим образом: элемент γ_{ij} матрицы Γ соответствует источнику i и эксперименту j . Если источник i не возбуждался в j -том эксперименте, то γ_{ij} равен нулю. Если возбуждение происходило, то γ_{ij} включает относительную амплитуду A_{ij} и относительную задержку по времени Δt_{ij} по отношению к первому источнику, возбужденному в j -том эксперименте.

$$\gamma_{ij} = A_{ij}e^{-j\omega\Delta t_{ij}} \quad (2.3)$$

★	0	0	0
0	★	0	0
0	0	★	0
0	0	0	★

 \cdot

1	0
0	1
$e^{-j\omega\Delta t_1}$	0
0	$e^{-j\omega\Delta t_2}$

 $=$

★	0
0	★
★	0
0	★

S
 Γ
 $S_{\text{смеш}}$

Рисунок 2.3. Обычная матрица источников S преобразуется в матрицу смешанных источников $S_{\text{смеш}}$ путем применения матрицы смешивания Γ . Каждая звезда обозначает собой один выстрел, а оттенок серого у звезд отражает относительное время возбуждения (Reinicke, 2015).

Таким образом, матрица смешивания выбирает определенные источники из матрицы источников и накладывает их друг на друга, как показано на рисунке 2.3. Из него становится ясно, что матрица смешивания Γ , так и матрица смешанных источников $S_{\text{смеш}}$ имеют больше строк, чем столбцов, то есть источников больше, чем экспериментов. Это и является физическим обоснованием того, что съемка с перекрывающимися источниками проводится за меньшее время.

В случае смешивания источников матрица приемников D не изменяется. Разумеется, импульсная характеристика Земли X не зависит от конфигурации съемки. Следовательно, сейсмические данные, полученные по результатам съемки с перекрывающимися источниками $P_{\text{смеш}}$, могут быть записаны следующим образом:

$$P_{\text{смеш}} = DXS_{\text{смеш}} = DXS\Gamma = P\Gamma \quad (2.4)$$

$$d = \Gamma m \quad (2.4a)$$

Для приведения формулы (2.4) к общепринятым обозначениям, используемым в научной литературе, она была переписана в виде формулы (2.4 а), где d обозначает непрерывную сейсмическую запись с перекрывающимся возбуждением, зарегистрированную на приемнике, а m - сейсмические данные, которые могли бы быть получены при традиционном подходе с одним источником. Процесс устранения влияния матрицы Γ подразумевает подавление интерференции от наложившихся во времени источников и называется деблендингом.

2.3. Разработка методики разделения данных перекрывающихся источников на основе инверсии

Псевдо-деблендинг

Деблендинг можно рассматривать как обратный процесс по отношению к смешиванию съемки, то есть:

$$m = \Gamma^{-1}d \quad (2.5)$$

где Γ^{-1} – обратная матрица смешивания

При съемке с перекрывающимися источниками приемник одновременно регистрирует сигналы от нескольких источников. Поэтому в сигнальной модели m переменных больше, чем в смешанных данных d , что также видно из рисунка 2.3. Более того матрица Γ не является квадратной. Необходимо отметить, что квадратная форма матрицы – это необходимое условие для обращения, а также матрица должна быть невырожденной. Следовательно, обратной матрицы Γ^{-1} – не существует. Кроме того, задача обращения уравнения (2.5) является недоопределенной и некорректной, так столбцов в матрице d меньше, чем в матрице m . Следовательно, для ее решения необходимы априорные знания или предположения о свойствах сигнала. Обычно первый шаг к решению таких задач – вычисление сопряженной транспонированной матрицы Γ^H , которая может рассматриваться как приближенная к Γ^{-1} . Таким образом можно получить “расчесанные” данные (combed data) или по-другому данные псевдо-деблендинга (pseudo-deblended data), которые можно рассматривать как первое приближение к желаемым данным m , где m' содержит весь сигнал из m , но также включает и интерференцию.

$$m' = \Gamma^H d \quad (2.6)$$

С практической точки зрения псевдо-деблендинг это процесс (Mahdad, 2011; Mahmoudian, 2023), позволяющий построить так называемую “расчесанную” сейсмограмму ОПП из непрерывной записи сейсмического приемника путем временного сдвига и нарезки трасс, то есть путем декодирования. Например, если N источников были смешаны с использованием задержки во времени как кодировки, то записанный смешанный выстрел копируется N раз, и каждая копия сдвигается по времени так, чтобы устранить задержки, введенные в ходе полевых работ. Таким образом декодирование стремится реконструировать сигналы каждого отдельного источника.

После, каждая из этих копий сдвигается по времени (декодируется) для устранения задержек, возникающих во время полевых работ. Так как импульс от нескольких источников закодирован в каждом смешанном выстреле, а сигнатуры источников не ортогональны процесс псевдо-деблендинга генерирует интерференцию.

Однако поскольку сигналы от разных источников не являются ортогональными, каждый декодированный (“расчесанный”) выстрел все еще содержит интерференцию. Таким образом псевдо-деблендинг не является полноценным разделением сигналом, а служит лишь первым

приближением, создающим основу для дальнейшей обработки, и, зачастую используется для целей визуализации и анализа интерференционного шума от перекрывающихся источников. Процесс смешивания и “расчесывания” данных продемонстрирован на рисунках 2.4 и 2.5.

Помимо введения концепции псевдо-деблендинга, другое распространённое предположение заключается в разреженности сигнала в некоторой преобразованной области, что используется для ограничения решений задачи инверсии. Для деблендинга сейсмических данных используются различные преобразования, обеспечивающие разреженное представление сигнала: преобразование Фурье, преобразование Радона, сейслет (seislet) – преобразование, курвлет (curvelet)-преобразование.

Применение разреженной инверсии для деблендинга сейсмических данных

Как было сказано выше, система, описанная в уравнении (2.5), является недоопределённой и не может быть решена напрямую. Однако перераспределение непрерывно записанных данных в отдельно записанные трассы (псевдо-деблендинг) предоставляет возможность для отделения когерентного сигнала от шума перекрывающихся источников. “Расчесанные” данные можно представить как наложение искомым несмешанных данных и трассового некогерентного шума. Наиболее часто используемая итеративная схема для восстановления когерентных компонентов псевдо-деблендинговых данных и подавления шума (интерференции) была впервые предложена (Mahdad, 2011), а затем расширена (Abma et al., 2015; Jeong et al., 2022). Этот алгоритм, который далее называется итеративный метод порогового жесткого отсечения (Iterative Hard Thresholding, ИИТ) (Blumensath, Davies, 2009), эквивалентен решению следующей задачи оптимизации с помощью алгоритма проксимального градиента (Parikh and Boyd, 2014):

$$\begin{aligned} J(m) &= f(m) + g(m) \\ f(m) &= \|d - \Gamma m\|_2^2 \\ g(m) &= \lambda \|S^H m\|_p, \quad (0 \leq p \leq 2) \end{aligned} \quad (2.7)$$

Здесь $f(m)$ – оператор близости, оценивающий отклонение модельных данных от наблюдаемых, $g(m)$ – регуляризирующий оператор, обеспечивающий разреженность решения в выбранной области преобразования, S^H – оператор разреженного преобразования, способствующий представлению данных в разреженной форме, λ – параметр регуляризации, задающий степень разреженности решения, p – норма разреженности L_0 , L_1 или L_2 , $p = 0$ для метода ИИТ.

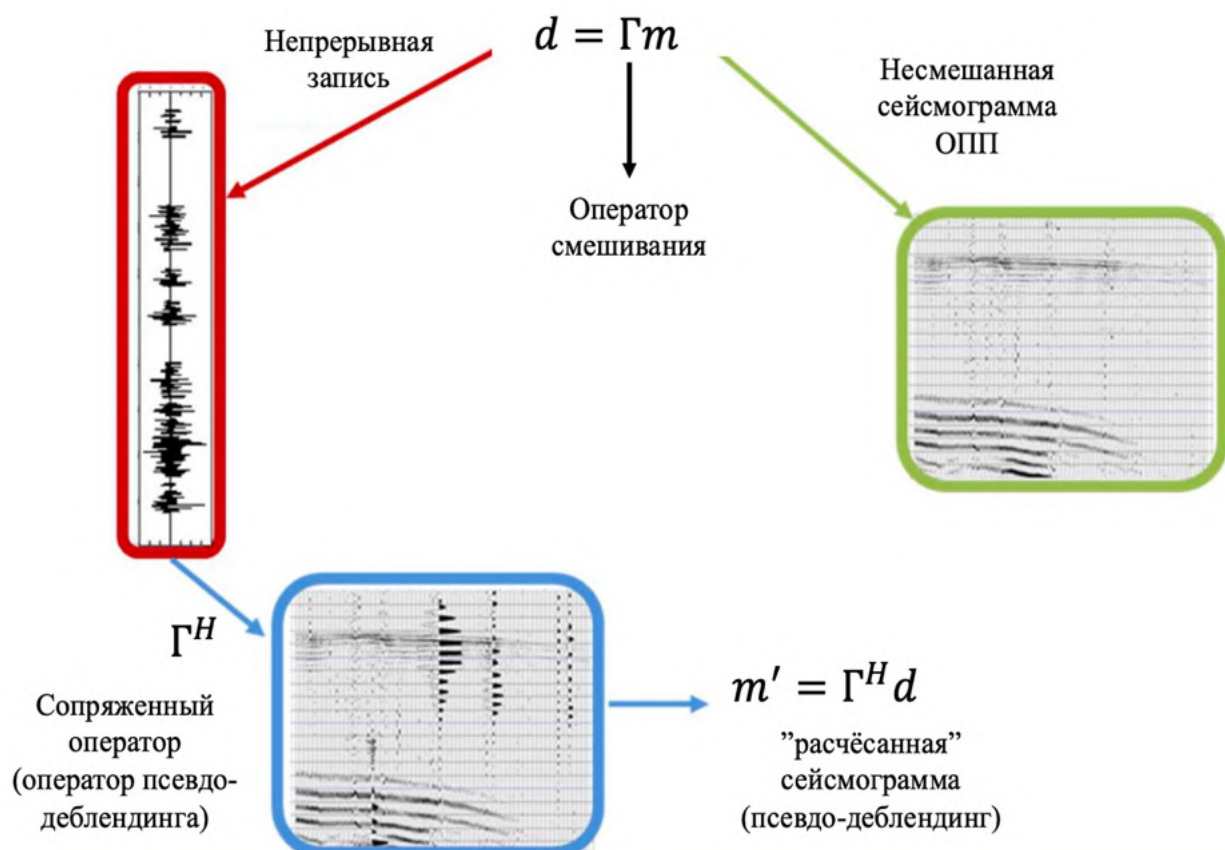


Рисунок 2.4. Схематическая иллюстрация оператора смешивания данных Γ , сопряженного оператора Γ^H . Здесь m – данные без смешивания, d – смешанные данные (Mahmoudian, 2023)

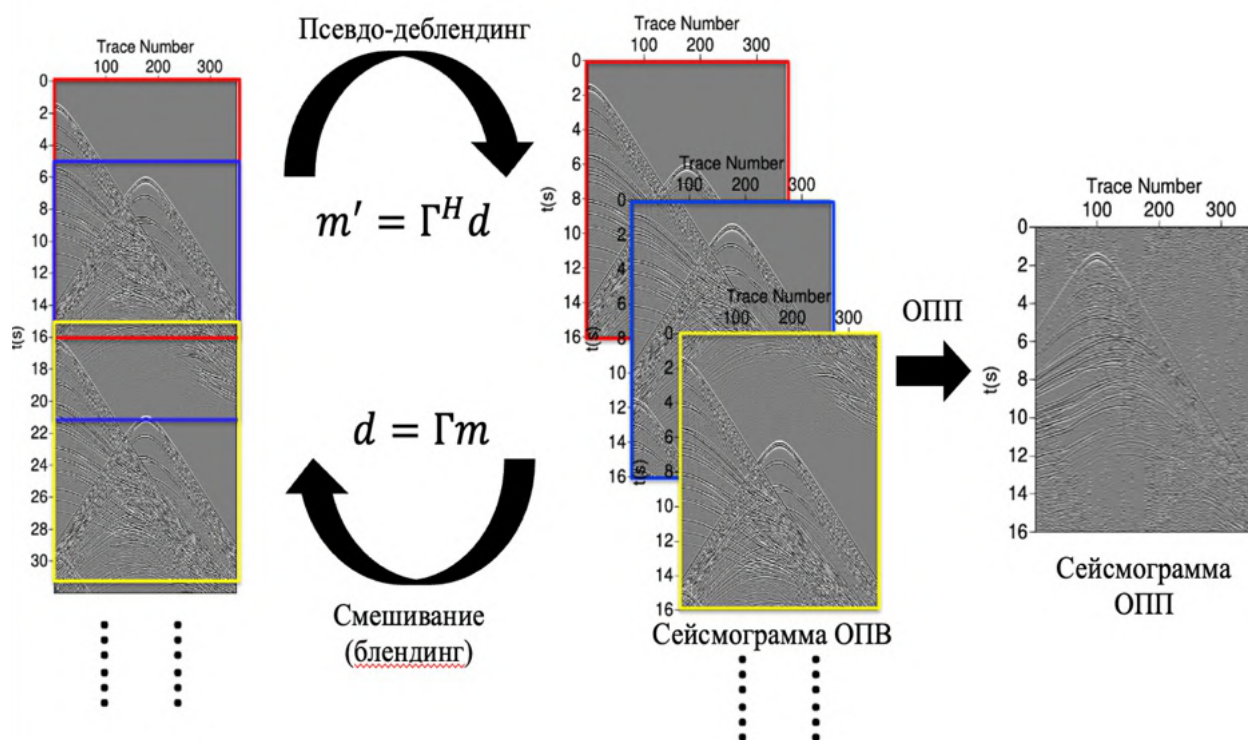


Рисунок 2.5. Иллюстрация применения оператора смешивания и "расчесывания" (Lin, 2022)

Основное различие между разными алгоритмами инверсии заключается в выборе разреженных преобразований и регуляризующих ограничений (например, L_0 , L_1 или L_2 нормы). В качестве разреженного преобразования в данной работе используется оконное 3D преобразование Фурье, выбор которого подробно обоснован в разделе 2.4. В свою очередь разреженность решений в задачах инверсии представляет собой особый интерес. Алгоритмы наименьших квадратов, также известные как L_2 -методы, минимизируют сумму квадратов невязок. В сравнении с ними L_1 -методы минимизируют сумму абсолютных значений невязок. Алгоритм спектрального проецированного градиента для минимизации L_1 нормы (Spectral Projected Gradient method for L_1 , SPGL1) (Van Den Berg, Friedlander, 2009) является примером истинного L_1 алгоритма. Множество работ опираются именно на L_1 регуляризацию при решении задачи разделения перекрывающихся источников (Kumar et al., 2021; Kamil et al., 2021; Ibrahim, Trad, 2019; Qu et al., 2016; Kumar et al., 2020). Методы, основанные на использовании L_0 нормы стремятся найти наиболее простое решение задачи, то есть такое, которое содержит минимальное количество ненулевых коэффициентов (или, эквивалентно, максимальное количество нулевых коэффициентов). Однако в настоящее время не существует универсальных алгоритмов L_0 (Abma, Foster, 2020), поскольку единственный способ найти решение с наибольшим числом нулевых коэффициентов – это исчерпывающий перебор, что практически неприменимо. В свою очередь, алгоритм ИТ можно воспринимать приближенным к L_0 поскольку он стремится к решению с наименьшим числом значимых коэффициентов используемого разреженного преобразования, что и обозначает L_0 разреженность. Это достигается путем итеративного восстановления от сильнейших к слабейшим компонентам сигнала, что позволяет получить достаточно разреженное решение, описывающее все данные.

Алгоритм деблендинга на основе разреженной инверсии

Определив разрежающее представление и инверсионный решатель, сформулируем подход к разделению сигналов при перекрывающемся возбуждении на основе алгоритма итеративного жёсткого порогирования (ИТ) в F–K-представлении. Соответственно, уравнение (2.7) можно записать в следующем виде:

$$\tilde{m} = \min_m \frac{1}{2} \|d - \Gamma m\|_2^2 + \varepsilon \|S^H m\|_0 \quad (2.8)$$

где, \tilde{m} искомые несмешанные данные, d наблюдаемая непрерывная сейсмическая запись, Γ – матрица смешивания, ε – параметр регуляризации, контролирующий степень разреженности, при этом используется $\varepsilon=1$ для достижения максимальной разреженности, S^H – оператор разреженного преобразования Фурье. Точное итеративное решение уравнения (2.8):

$$\tilde{m}_{i+1} = (S^{-1} \tau_i S)(\tilde{m}_i + \alpha \Gamma^H (d - \Gamma \tilde{m}_i)) \quad (2.9)$$

где S^{-1} – обратное 3D преобразование Фурье, S – прямое 3D преобразование Фурье, Γ^H – транспонированная матрица смешивания, α коэффициент масштабирования, τ_i – оператор порогового значения.

$$\tau_i(m) = \begin{cases} m, & |m| > \tau^i \\ 0, & |m| \leq \tau^i \end{cases} \quad (2.10)$$

τ^i обозначает порог на i – той итерации. Этот порог задается пользователем эмпирически, например на основании линейного или экспоненциального закона убывания в зависимости от номера итерации. Или же может быть адаптивно вычислен на основании самих данных (см. формулу 2.11). Для обеспечения стабильности и сходимости алгоритма используется масштабирование α , снижающее величину вводимой поправки на каждой итерации (Abma, Foster, 2020). Масштабирование необходимо по причине того, что при больших количествах одновременно работающих источников (т.е. кратности перекрытия сигналов), что типично для наземной сейсморазведки с перекрывающимися источниками, уравнение (2.9) становится более чувствительным к ошибкам из-за высокой степени наложения сигналов. Коэффициент масштабирования α выбирается равным обратной величине максимальной кратности перекрытия сигналов.

Для более эффективного извлечения полезного сигнала алгоритм дополнен функцией трёхмерного оконного F-K преобразования, что позволяет применять разреженное преобразование в локальных окнах. Такое локальное преобразование значительно повышает разреженность сигнала и обеспечивает эффективное представление наклонных событий в области преобразования. Кроме того, предлагается использовать частотно-зависимый жесткий порог, который определяется для каждой частоты исходя из исходного набора данных до применения алгоритма:

$$\begin{aligned} \tau_{max} &= \max \left\{ \max \left(\tilde{d}_r^1(:, :, :) \right) \max \left(\tilde{d}_r^2(:, :, :) \right) \dots \max \left(\tilde{d}_r^{n_\omega}(:, :, :) \right) \right\} \\ \tau_{min}(\omega) &= \min \left\{ \max \left(\tilde{d}_r^1(\omega, :, :) \right) \max \left(\tilde{d}_r^2(\omega, :, :) \right) \dots \max \left(\tilde{d}_r^{n_\omega}(\omega, :, :) \right) \right\} \end{aligned} \quad (2.11)$$

где, $\tilde{d}_r^j(\omega, k_x, k_y)$ – это трехмерное представление j -го окна исходных смешанных данных, вычисляемого как $\tilde{d}_r^j = F_j W_j d_r$. Для τ_{min} сделано допущение, что хотя бы одно окно полностью представляет уровень шума для каждой частотной компоненты. Таким образом, жесткий частотно-зависимый порог для каждой частотной компоненты позволяет алгоритму избежать избыточного числа итераций, а также предотвратить преждевременное завершение алгоритма. Более того, применение такого порога позволяет восстановить весь частотно-волновой спектр исходных данных. Принимая во внимание эти два дополнения, уравнение (2.9) преобразуется в следующий вид:

$$\tilde{m}_{i+1} = \sum_{j=1}^{n_w} M_j S_j^{-1} T_{\tau_i(\omega)} S_j W_j \{ \tilde{m}_i + \alpha \Gamma^H (d - \Gamma \tilde{m}_i) \}, \quad (2.12)$$

где, n_w – количество окон преобразования Фурье, W_j – оператор окон Фурье разделяющий куб исходных данных на окна с заданными областями перекрытия, M_j – оператор восстановления окон Фурье, соединяющий их в один куб, $T_{\tau_i(\omega)}$ оператор порогового значения. Таким образом, предложенный автором алгоритм последовательно восстанавливает исходные данные, очищенные от интерференционных шумов перекрывающихся источников. Реконструкция начинается с событий, имеющих наибольшую амплитуду, и постепенно переходит к событиям с меньшими значениями, завершаясь либо по достижению заданного числа итераций, либо по достижению минимального порогового значения. Схема работы данного алгоритма приведена в таблице 1.

Таблица 1. Алгоритм разделения сигналов от перекрывающихся источников на основе инверсии методом итеративного жесткого порога

1:	Входные данные: $d, \Gamma, W, M, n_w, \alpha, \tau_{max}, \tau_{min}(\omega), n_{итер}$
2:	Инициализация: $i = 0, \tilde{m}_0 = 0, R^{-1} = d, \tau_0(\omega) = \tau_{max}, tol = \min \tau_{min}(w)$
3:	До тех пор, пока $\min \tau_{min}(w) \geq tol \ \& \ i \leq n_{итер}$ выполнять следующее
4:	$R^i = d - \Gamma \tilde{m}_i$;
5:	если $\ R^i\ _2 > \ R^{i-1}\ _2$ тогда
6:	остановить
7:	$\tilde{m}_{i+1} = \sum_{j=1}^{n_w} M_j S_j^{-1} T_{\tau_i(\omega)} S_j W_j \{ \tilde{m}_i + \alpha \Gamma^H R^i \}$
8:	$\tau^{i+1}(\omega) = \tau_{max} \times 0.9^{i+1}$
9:	если $\tau^{i+1}(\omega) \leq \tau_{min}(\omega)$ тогда
10:	$\tau^{i+1}(\omega) = \tau_{min}(\omega)$;
11:	$i = i + 1$
12:	завершить до тех пор, пока
13:	Возврат \tilde{m}_i

2.4 Выбор разреженного преобразования для использования в алгоритме

Разреженные преобразования

Традиционное представление о сигналах основано на теореме Котельникова (Найквиста-Шеннона), которая говорит о том, что сигналы должны быть дискретизированы с частотой, вдвое превышающей частоту сигнала, чтобы быть восстановленными. В теории же сжимающего ощущения (compressed sensing) предполагается, что сигналы могут быть сжаты в каком-либо разреженном (сжатом) пространстве. Это разреженное пространство значительно уменьшает размер набора возможных сигналов по сравнению с основным пространством сигнала (в сейсморазведке это x - t) при восстановлении сигнала.

Граничин (2009) приводит следующее определение сжимаемого сигнала: Сигнал f называется сжимаемым, если у него есть представление в виде формулы (2.13), в которой только несколько коэффициентов $x[j]$ достаточно велики, а большинство остальных — малы.

$$f = \sum_{j=1}^N x[j]\psi_j \text{ или } f = \psi x \quad (2.13)$$

где, x — $N \times 1$ вектор-столбец весовых коэффициентов $x[j]$. f — представление сигнала во временной (пространственной области), а ψ — представление в ψ (сжимаемой) области.

На практике в обработке данных сейсморазведки уже достаточно давно и эффективно используют разреженные преобразования, примерами таких преобразований являются: F-K преобразование (рисунок 2.6б), преобразование Радона (рисунок 2.6в) (линейное, параболическое, гиперболическое), курвлет преобразование и сейслет преобразование.

Выбор разреженного преобразования

Большинство алгоритмов подавления интерференции на основе инверсии используют F-K преобразование (Abma et al., 2015; Song et al., 2019; Zhang, Song, 2025; Jeong et al., 2022; Ravasi, 2024), реже преобразование Радона (Ibrahim, Trad, 2019; Ibrahim, Sacchi, 2014; Gong et al., 2017), и, иногда курвлет и сейслет, вейвлет преобразования (Chen et al., 2014; Velasques, 2020). Для эффективного сравнения разреженности различных преобразований предлагается использовать одну и ту же сейсмограмму ОПП (рисунок 2.7) в качестве входных данных. К этой сейсмограмме применить ряд преобразований: F-K, вейвлет, сейслет, курвлет, линейное и гиперболическое преобразование Радона. Анализ выполняется в два шага: глобально и локально (в отдельных пространственно-временных окнах). Сначала оценивается разреженность во всём объёме, затем — в локальных окнах, чтобы понять, как локальные события влияют на структуру и скорость убывания коэффициентов преобразования. Коэффициенты в каждом преобразованном домене сортируются по убыванию амплитуды, формируя убывающие одновременные векторы, а затем нормализуются (Gan et al., 2016).

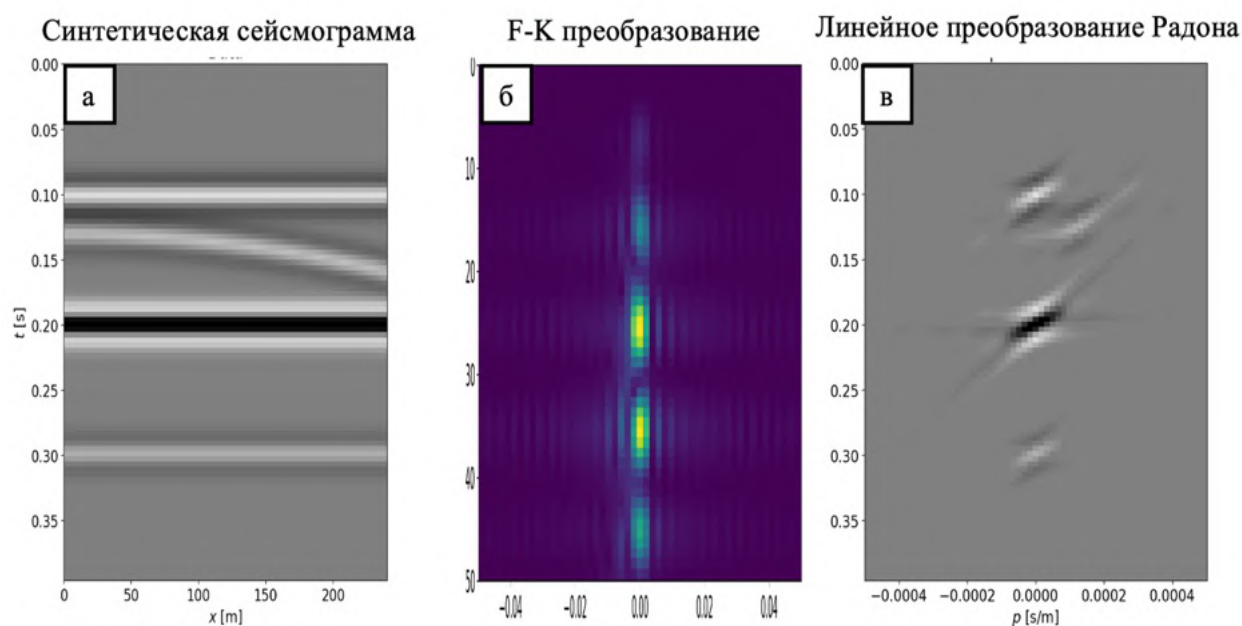


Рисунок 2.6. Иллюстрация некоторых разреженных преобразований. а – синтетическая сейсмограмма с несколькими событиями, б – эта же сейсмограмма после F-K преобразования, в – линейное преобразование Радона

После этого на одном графике отображаются все кривые убывания коэффициентов в зависимости от их порядкового номера. Оценка разреженности производится на основании скорости убывания коэффициентов, чем быстрее они убывают (кривая спадает наиболее резко), тем выше степень разреженности преобразования. Таким образом, значимая информация сосредоточена в меньшем числе коэффициентов, а остальные можно отбросить без существенной потери качества сигнала. На рисунке 2.8 представлены графики убывания первых 500-т коэффициентов преобразования для трех случаев.

Первый случай (рисунок 2.8а) показывает график для всей сейсмограммы целиком. Наиболее выраженную разреженность демонстрируют вейвлет, курвлет и сейслет преобразования, где коэффициенты убывают наиболее быстро, что указывает на эффективную сжимаемость и хорошую локализацию энергии сигнала. За ними следуют линейное и гиперболическое преобразования Радона ($V=2000$ м/с), где степень сжимаемости во многом зависит от правильно подобранных параметров (в частности, скорости распространения волн). Последним идет F-K преобразование, которое в данном глобальном контексте демонстрирует наименьшую разреженность. Во втором и третьем случае (рисунок 2.8 б, в) анализ проводится в ограниченных временно-пространственных окнах. Разреженность у вейвлет, курвлет и сейслет преобразований остается высокой, подтверждая их эффективность для локальных окон. В свою очередь, F-K преобразование в локальном окне показывает лучшую разреженность, что указывает на его чувствительность к глобальной неоднородности сигналов. Линейное преобразование Радона также демонстрирует хорошую эффективность в локальном анализе,

особенно при наличии линейных событий. В то же время гиперболическое преобразование Радона показывает худшие результаты, вероятно из-за некорректного выбора скорости, что приводит к смазанной энергии в области Радона.

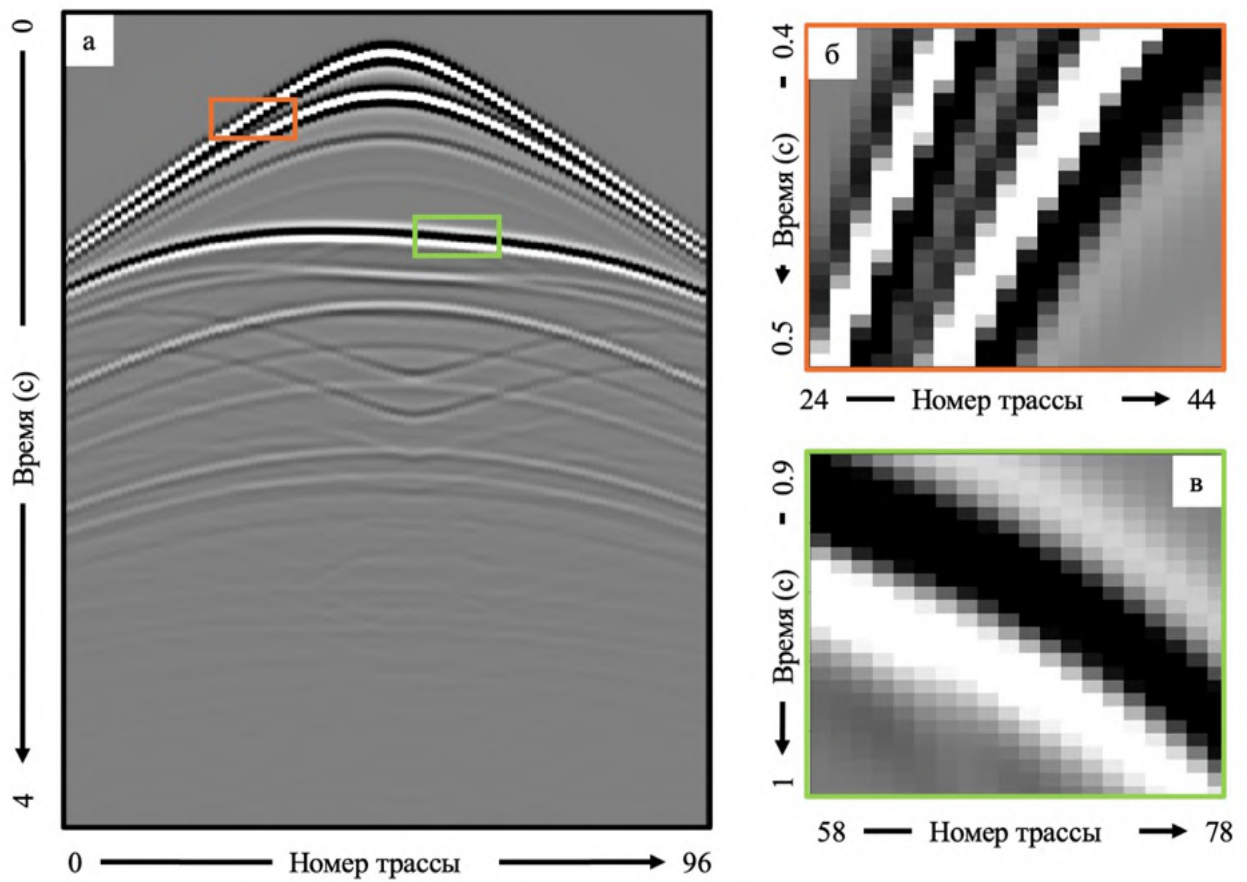


Рисунок 2.7. а - Сейсмограмма ОПП, используемая для оценки разреженности. б,в – оранжевое и зеленое локальное окно размером 20 трасс и 0,1 с. используемое для оценки разреженности.

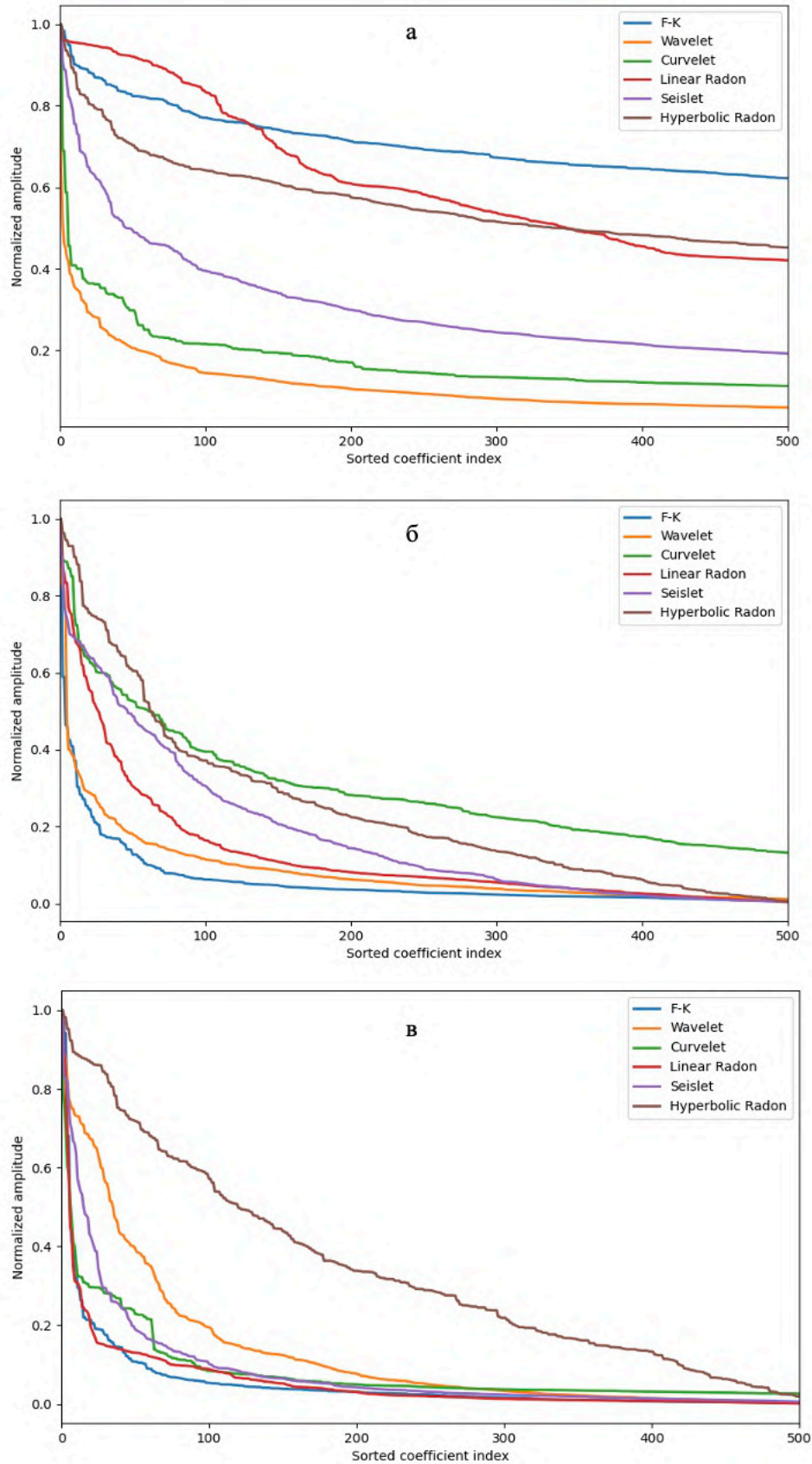


Рисунок 2.8. Сравнение кривых убывания коэффициентов для различных разреженных преобразований: а – для всей сейсмограммы целиком (рисунок 2.7. а), б – для оранжевого локального окна (рисунок 2.7. б), в – для зеленого локального окна (рисунок 2.7. в)

Таким образом, все вышеописанные разреженные преобразования демонстрируют достаточную степень сжимаемости, особенно в контексте применения их локальных (оконных) версий в алгоритмах подавления шума от перекрывающихся источников. Более того, для успешного разделения сигнала и интерференции достаточно, чтобы даже в тех окнах, где сигнал не отличается высокой разреженностью, его структура было более разреженной по сравнению с помехами.

Тем не менее, при выборе между различными преобразованиями особое внимание следует уделить F-K преобразованию, так как оно обладает следующими преимуществами:

- Высокая вычислительная эффективность и простота реализации – F-K преобразование основано на быстром преобразовании Фурье (FFT), что обеспечивает низкие вычислительные затраты и делает его удобным для обработки больших объемов данных.
- Минимальная параметризация – в отличие от других методов, F-K требует настройки только размера окон, тогда как, например, преобразование Радона требует выбора диапазона скоростей, что усложняет процесс. Некорректный выбор скорости существенно влияет на эффективность преобразований Радона, что было показано ранее.
- Локальная разреженность – в небольших окнах сейсмические события выглядят достаточно разреженными, что позволяет эффективно использовать F-K в задачах разделения сигналов.
- F-K преобразование обладает свойством обратимости: прямое и обратное преобразование эквивалентны по структуре и реализуются с одинаковой точностью. Преобразование Радона и другие преобразования не являются строго обратимыми.
- Устойчивость к алиасингу. В задачах разделения источников FFT используется для вычисления когерентности сигналов, а когерентность алиасинговых и неалиасинговых событий остаётся одинаковой. Например, если событие замкнулось в F-K области, оно останется замкнутым и в выходных данных.

Следовательно, с учетом вышеперечисленных факторов, целесообразно выбрать F-K преобразование в качестве основы для алгоритма разделения сигналов от перекрывающихся источников.

2.5 Влияние случайной задержки между выстрелами на характер интерференции при смешивании данных

Случайность времен возбуждения источников имеет определяющее значение при проведении морских работ с перекрывающимися источниками. Эффективность съемки с перекрывающимся возбуждением основана на том, что интерференция между источниками должна быть некогерентной, а полезный сигнал – когерентным.

Ранее было показано (формула 2.3, рисунок 2.3), что каждый элемент матрицы Γ содержит фазовый множитель вида $e^{-jw\Delta t_{ij}}$. В случае, когда временной интервал между возбуждением постоянен, к матрице данных P применяется одинаковый фазовый сдвиг, не изменяющий когерентную структуру интерференции. Напротив, при случайной задержке между выстрелами фазовые множители в матрице Γ различаются, что вызывает варьирование фазы по столбцам матрицы P . В результате этого интерференционные сигналы становятся некогерентными и распределяются по всей записи, что способствует их более эффективному подавлению.

В исследовании (Jiang, Abma, 2010; Abma, 2014) посвященном моделированию смешивания источников, предложена граница минимального диапазона случайных временных задержек, необходимых для разделения сигналов при миграционной обработке. Ограничение Цзяна представлено на рисунке 2.9. На фоне рисунка показаны результаты серии моделирований для различных задержек случайных временных сдвигов и трасс с разным частотным содержанием. Каждый цветной блок представляет собой среднее значение остаточной ошибки между разделёнными данными и исходными, полученное из серии экспериментов.

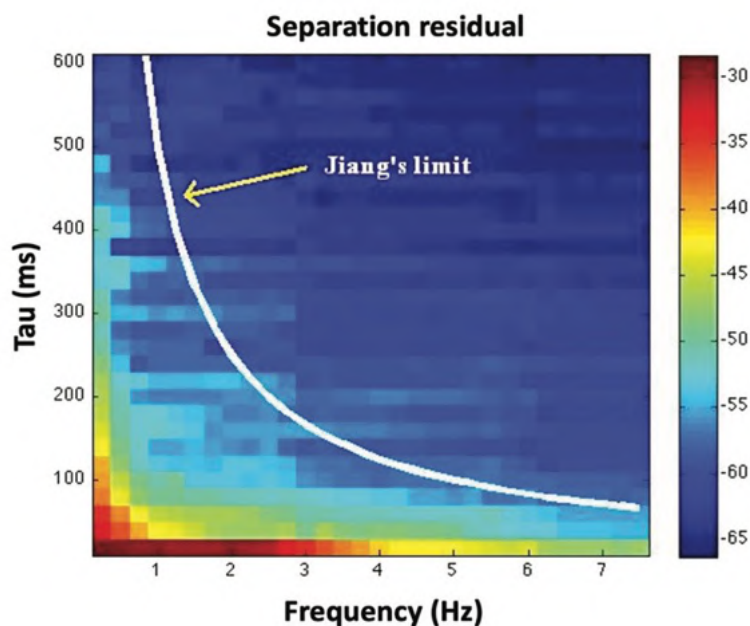


Рисунок 2.9. Зависимость качества деблендинга от размера случайных задержек выстрелов и частоты, цветом выделена степень подавления шума, красный – плохая сепарация сигнала от шума, синий – хорошая сепарация (Abma, 2014).

Форма ограничения Цзяна, связывающая величину временного сдвига с максимальной частотой, имеет физический смысл, если рассматривать сигнал как совокупность синусоид. Так на рисунке 2.10 представлено два набора сигналов: один содержит сигнал с частотой 1 Гц, другой с частотой 20 Гц. Вторая трасса в каждом наборе имеет временной сдвиг 16 мс по отношению к первой трассе. Так как корреляция часто используется для отображения сходства и сдвига между трассами, следующие две трассы в каждом наборе представляют собой результаты корреляции. Первая корреляция в каждом наборе – это автокорреляция первой трассы (корреляция трассы самой с собой), что дает эталонное значение без сдвига. Вторая корреляция – это корреляция между первой и второй трассами, где есть сдвиг 16 мс между ними.

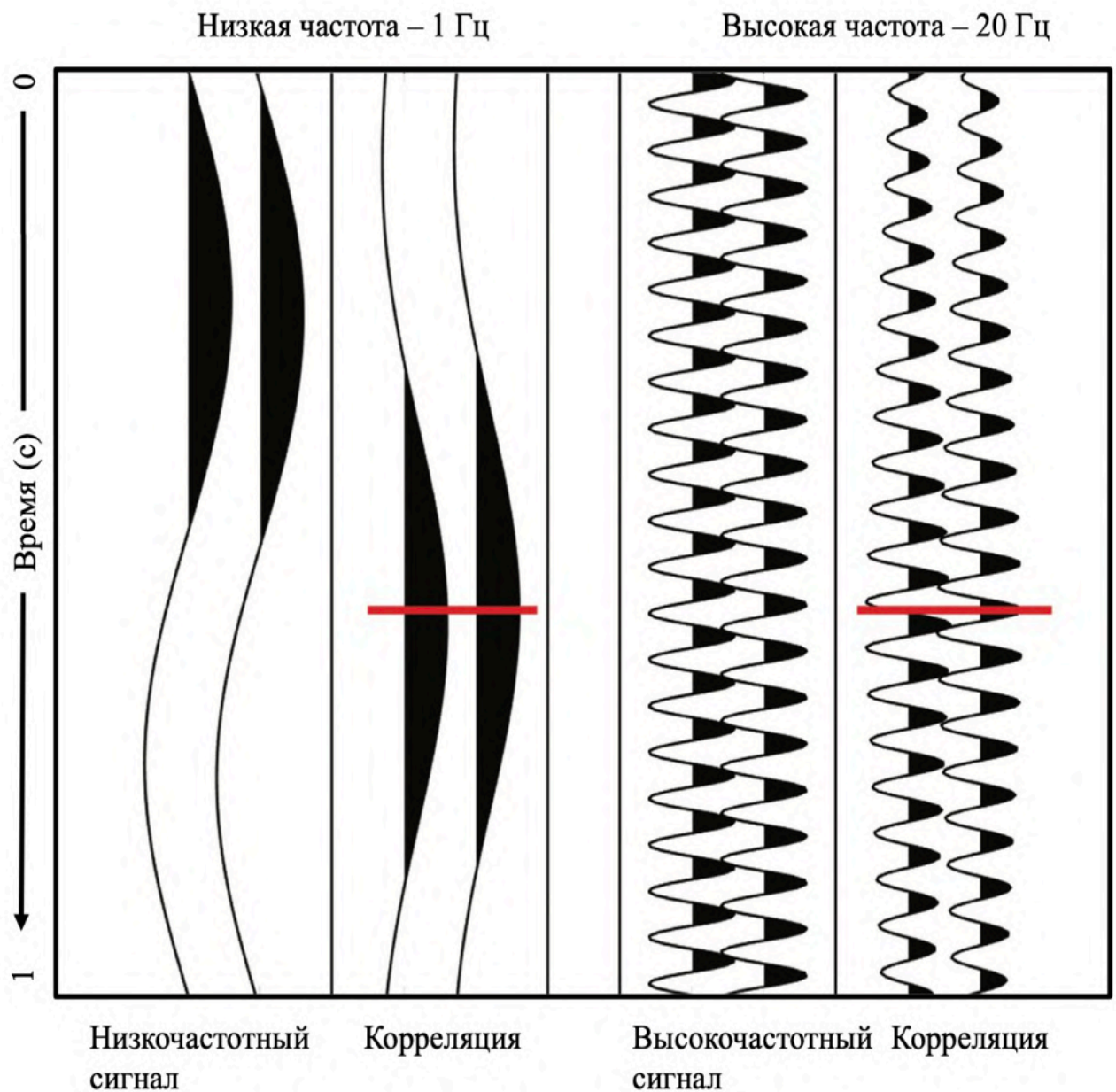


Рисунок 2.10. Низко и высокочастотный сигнал, второй сигнал сдвинут на 16 мс и корреляция между первоначальными и сдвинутыми сигналами (Abma, Foster, 2020).

Сдвиг легко обнаружить в сигнале с частотой 20 Гц, тогда как в сигнале с частотой 1 Гц он практически незаметен. Красные линии на каждом графике корреляции показывают нулевой сдвиг, что наглядно иллюстрирует разницу в откликах корреляции. Небольшой сдвиг в низкочастотном сигнале трудно распознать, в то время как тот же самый сдвиг в высокочастотном сигнале легко обнаружить как в самих сигналах, так и в их корреляциях. Таким образом небольшой временной сдвиг вызывает большую некогерентность между двумя высокочастотными сигналами, чем между двумя низкочастотными.

Разделение перекрывающихся источников зависит от когерентности полезного сигнала и некогерентности интерференции. Если события представляют собой интерференцию, которую необходимо распознать как некогерентную, то для высокочастотного сигнала требуется гораздо меньший временной сдвиг, чтобы он выглядел некогерентным, тогда как для низкочастотного сигнала требуется гораздо больший случайный временной сдвиг, чтобы его можно было идентифицировать как интерференцию. Это отражается в увеличении диапазона случайных сдвигов на рисунке 2.9 для низких частот.

Ограничение Цзяна, по сути, гласит, что случайные временные сдвиги должны составлять примерно половину периода, соответствующего частоте сигнала, то есть того интервала времени, в котором корреляция между двумя трассами остается положительной. Исходя из этого ограничения выбор минимального диапазона временного сдвига в размере ± 250 мс является логичным и достаточным, так как именно эта величина обеспечивает возможность для разделения сигналов вплоть до частоты полноволновой инверсии (FWI) около 2 Гц.

Для оценки влияния временного смещения на характер интерференции было выполнено численное моделирование шума от перекрывающихся источников, наложенного на компоненту гидрофона сейсмограммы ОПП донной станции (рисунок 2.12а) с различным значением временного диапазона случайной задержки $\pm \mu$. На рисунке 2.11 приведен пример случайных времен сдвига, сгенерированных для 160 ПВ с равномерным распределением в диапазоне ± 1 секунда, а также показана соответствующая гистограмма интервалов времен между последовательными выстрелами. Аналогичным образом были сформированы последовательности для распределения $\pm 0.25, 0.5, 0.75, 1.5$ секунд (таблица 2). Для всех распределений $\pm \mu$ выполнено синтетическое смешивание данных, результаты смешивания показаны на рисунке 2.12 из которого следует, что увеличение диапазона случайного смещения $\pm \mu$ ведет к постепенному размытию шума от интерференции, чем больше диапазон случайных задержек, тем более некогерентной выглядит интерференция. При этом верхняя граница $\pm \mu$ ограничена: разброс задержек свыше ± 1 с заметно влияет на геометрию полевых работ, тогда как дальнейшее увеличение даёт всё меньший прирост некогерентности шума.

Таблица 2. Сравнение стандартного отклонения σ интервалов времен между последовательными выстрелами для различного диапазона смещения времен выстрелов $\pm\mu$

Рисунок	Значение диапазона смещения $\pm\mu$	Стандартное отклонение σ
2.12б	± 0.25 с.	0.22 с.
2.12в	± 0.5 с.	0.44 с.
2.12г	± 0.75 с.	0.66 с.
2.12д	± 1 с.	0.87 с.
2.12е	± 1.5 с.	1.31 с.

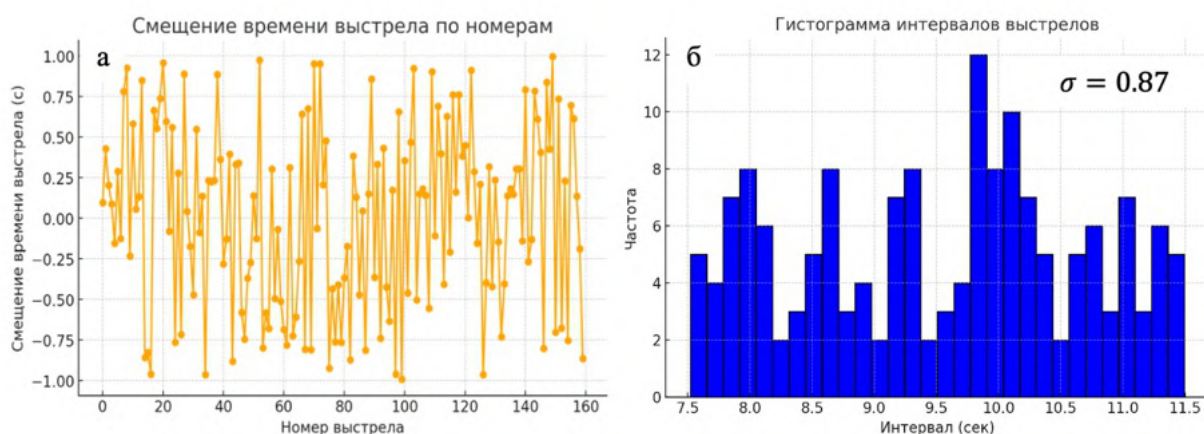


Рисунок 2.11. Случайные смещения времен сдвига на основе равномерного распределения $\mu = \pm 1$ (а), гистограмма интервалов времен между последовательными выстрелами для сдвигов (б), стандартное отклонение $\sigma = 0.87$ с

2.6. Выводы к главе 2

1. Сформулирована матричная постановка задачи разделения сигналов от перекрывающихся источников. Задача обратной инверсии и нахождения несмешанных данных является некорректной и требует априорных ограничений (разреженности) для устойчивого решения.
2. Сформулирован и реализован алгоритм разделения сигналов от перекрывающихся источников на основе инверсии методом итеративного жесткого порога (Iterative Hard Thresholding, ИТ).
3. Сравнительный анализ разреженных преобразований показал, что оконное 3D F–K является оптимальным разрежающим представлением для алгоритма в условиях перекрывающегося возбуждения.
4. Представлено теоритическое и практическое обоснование необходимости введения случайных задержек на основе равномерного распределения в диапазоне $\pm 0.25 \dots \pm 1$ с

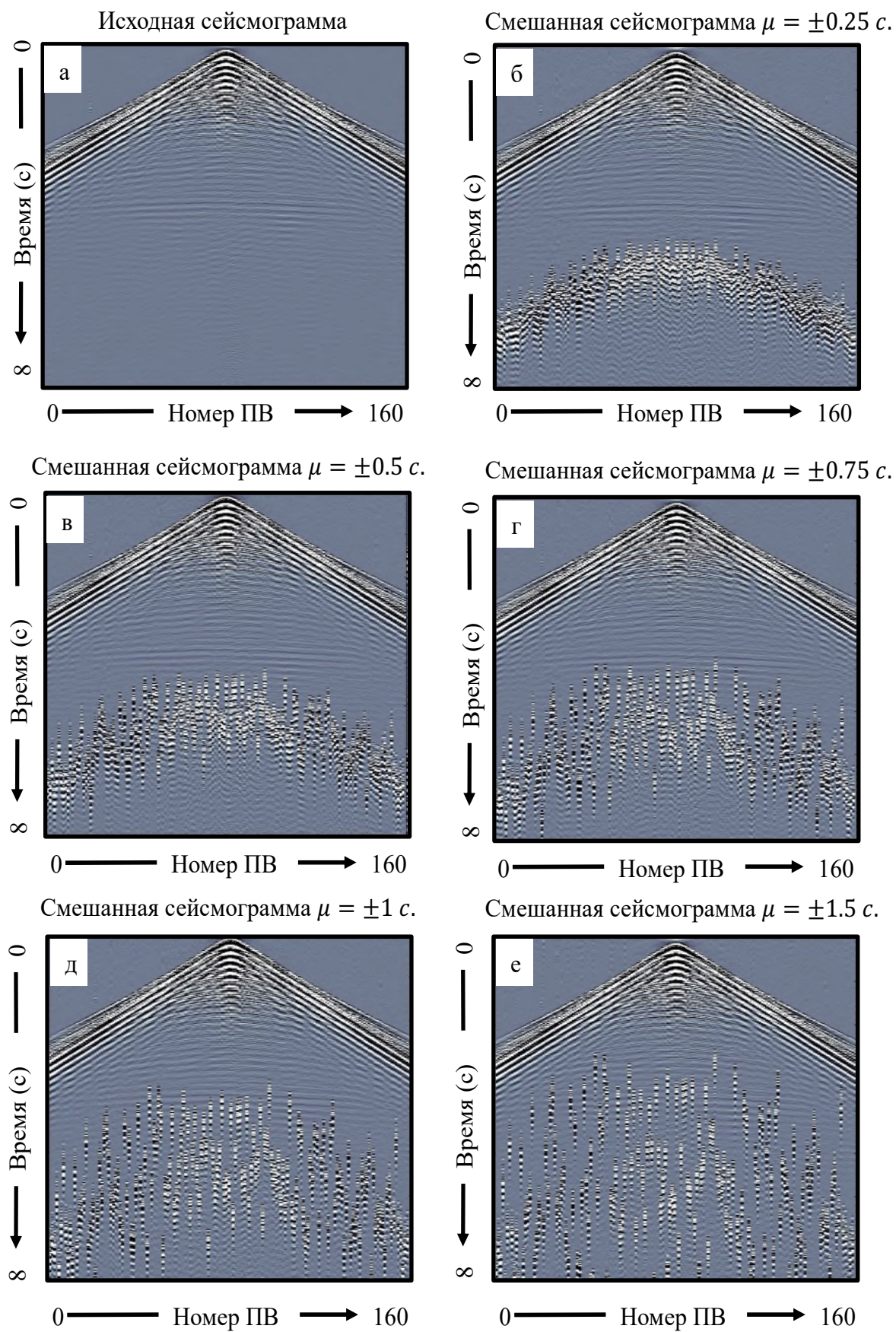


Рисунок 2.12. Исходная сейсмограмма (а). Сейсмограммы, смешанные с различным смещением времени $\mu = \pm 0.25, 0.5, 0.75, 1.5$ – б, в, г, д, е соответственно.

Глава 3. Разделение сигналов от перекрывающихся источников на примере синтетически смешанных данных⁴

3.1. Исходные данные и схема смешивания

Для демонстрации эффективности предложенного алгоритма планируется использовать реальные данные, зарегистрированные донной станцией, с последующим выполнением синтетического смешивания и применением процедуры разделения сигнала. Исходный набор представляет собой 3D сейсмограмму общего пункта приема, которая содержит 80 линий возбуждения сигнала с интервалом между линиями 50 метров. Каждая линия состоит из 160 пунктов возбуждения с интервалом 50 метров между соседними ПУ. Таким образом, сейсмограмма включает 12 800 пунктов возбуждения, расположенных в регулярной сетке 50х50 метров. Исходные сейсмограмма по нескольким линиям возбуждения и сеть возбуждения представлены на рисунке 3.1.

Далее был сформирован синтетический массив времен возбуждения источников, при котором (рисунок 3.2 а):

- Использовалось 2 судна-источника, каждое буксировало по два источника. Интервал между последовательными возбуждениям одного источника составлял 20 секунд с добавлением случайного смещения на основе раномерного распределения в диапазоне ± 1 секунда
- Каждое судно выполняло отстрел 40 линий возбуждения, по две линии за один проход по профилю, при постоянном взаимном расстоянии 2000 метров. Первое судно работало в диапазоне координат Y от 0 м до 2000 метров, второе от 2000 до 4000
- Первое судно начинало работу одновременно со вторым, при этом суда двигались навстречу друг другу
- Время на разворот судов учитывалось отдельно и составляло от 21,6 минут до 23,3 минут

В результате была построена карта времен возбуждения источников (рисунок 3.2б). Данная схема возбуждения эквивалентна реальным полевым работам с перекрывающимся возбуждением в режиме «флип-флоп», когда два судна буксируют по два источника каждое. Далее, на основании полученной последовательности времен был сформирован оператор смешивания Г, с помощью которого исходные данные были синтетически смешаны. На рисунке 3.3 показаны результаты псевдо-деблендинга («расчесывания») полученных смешанных данных, представленные для тех же инлайнов и кросслайнов, что и на рисунке 3.1.

⁴При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ отражены основные результаты, положения и выводы исследования: **Казанин Г.А.**, Гайнанов В.Г., Литвачук А.В., Ткач В.С. Разделение сигналов от перекрывающихся источников на примере синтетически смешанных данных морской сейсморазведки с донными станциями // Приборы и системы разведочной геофизики № 4 (83). 2024 С. 52–58. EDN: DDREGM (0,81 п.л., вклад автора 70 %). Импакт-фактор 0,056 (РИНЦ)

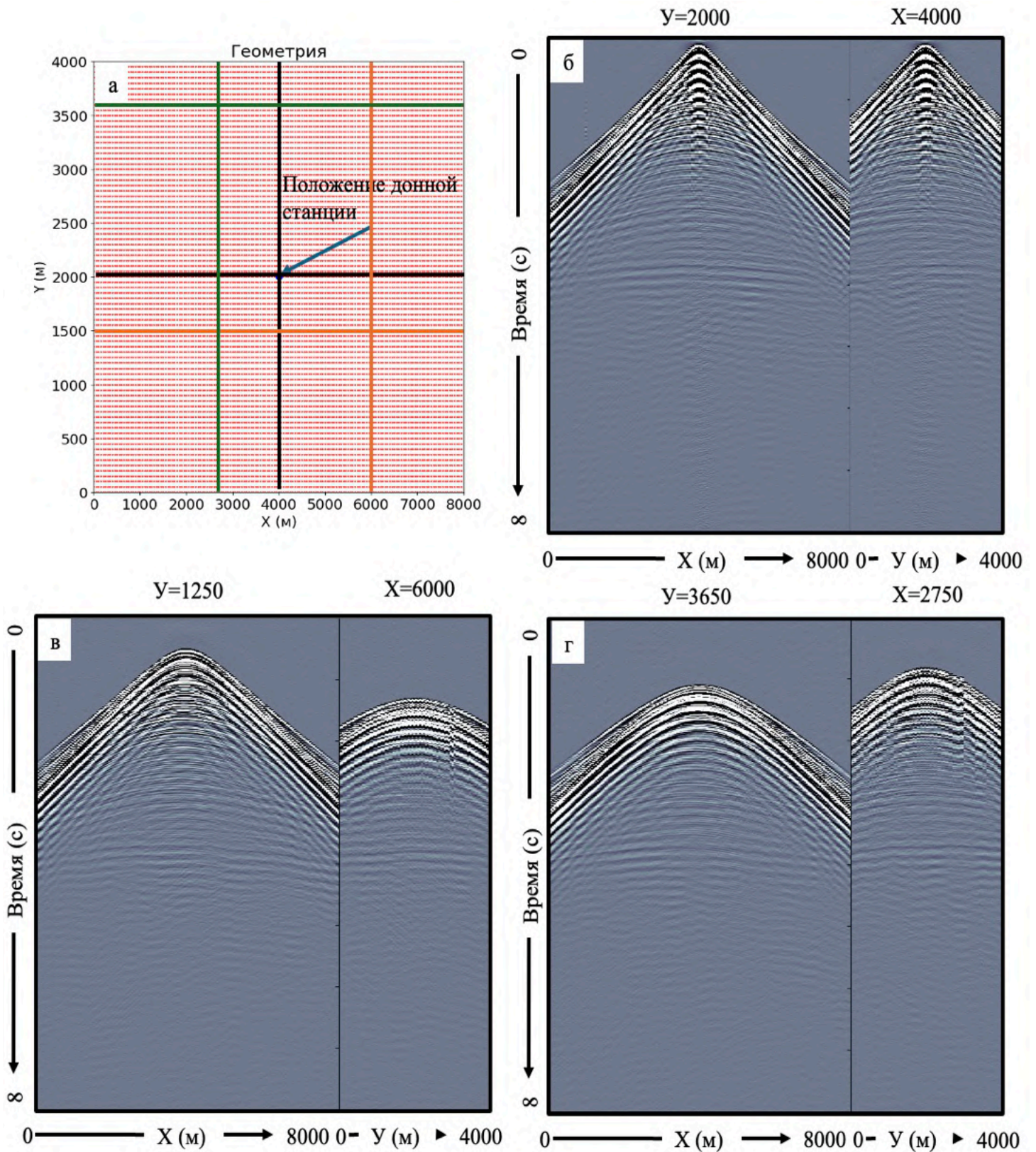


Рисунок 3.1. Первоначальная сетка возбуждения (а), донная станция расположена в центре расстановки в координатах $x=4000$, $y=2000$. б, в, г – различные срезы данных, б – черный крест, в – оранжевый, г - зеленый

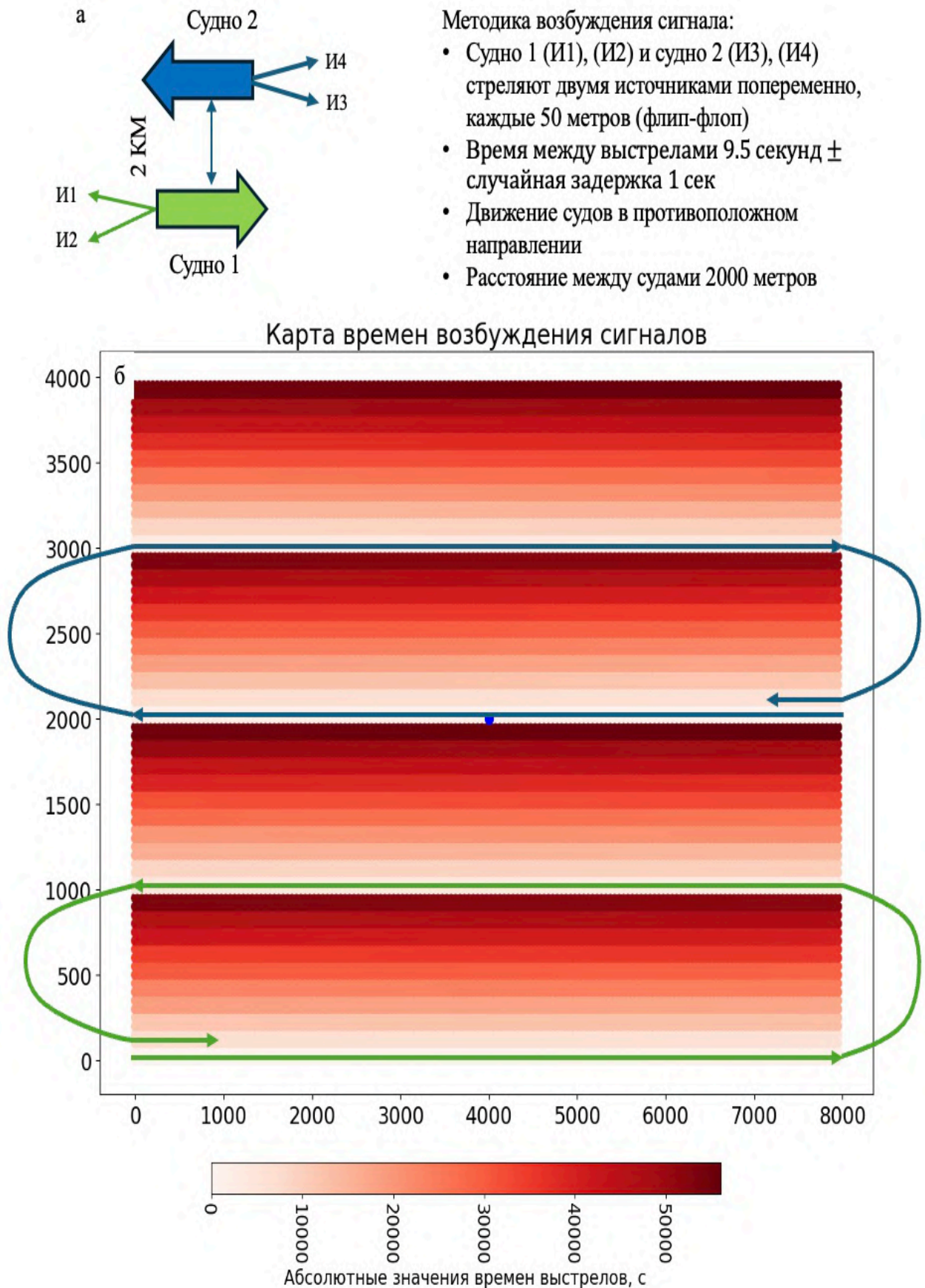


Рисунок 3.2. а – схема возбуждения сигнала перекрывающимися источниками, б – карта времен возбуждения сигнала, каждое судно обрабатывает по 40 линий

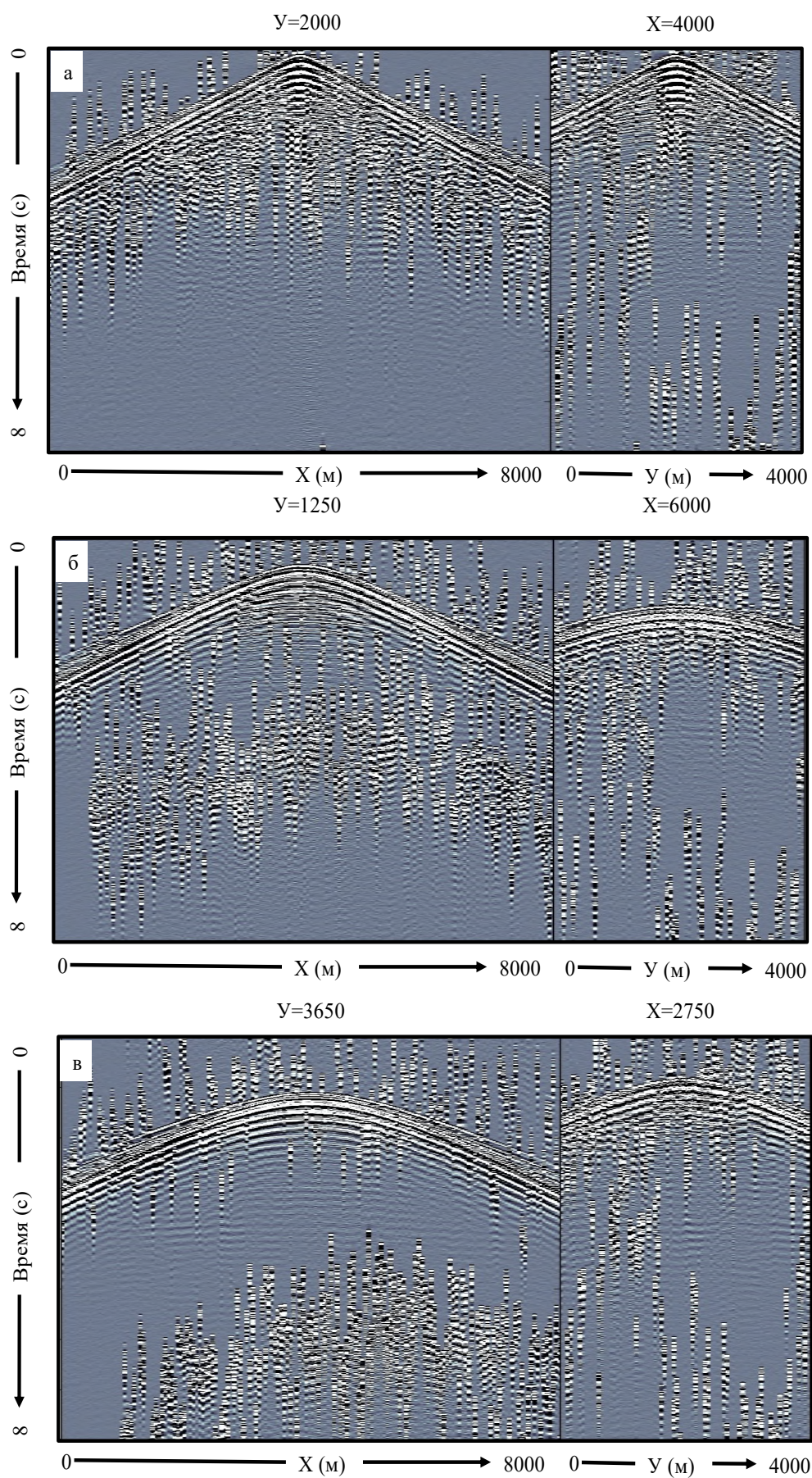


Рисунок 3.3. Результаты псевдо-деблендинга полученных смешанных данных для разных инлайнов и кросслайнов

Как видно на рисунке 3.3 интерференционный шум проявляется по всей временной шкале записи, начиная с ранних времен и вплоть до глубинных интервалов. Основная особенность шума заключается в его некогерентности по отношению к отраженным волнам. В верхней части сейсмограмм (0–2 с.) наблюдается наиболее интенсивное проявление интерференции, выражающееся в виде высокоамплитудных «рваных» событий, накладывающихся друг на друга и частично маскирующих полезный сигнал. По мере увеличения времени регистрации шум приобретает зернистую структуру, которая размывает и затемняет глубинные отражения. Пространственное распределение интерференции также указывает на ее случайный характер. На инлайновых срезах шум проявляется как наложение множества несогласованных волновых пакетов, в то время как на кросслайновых срезах отчетливо просматривается «зернистость» и отсутствие четкой пространственной корреляции. Сравнение разных примеров (рисунок 3.3 а, б, в) показывает постепенное снижение когерентности интерференции при изменении параметров моделирования. В частности, на рисунке (а) шум имеет наибольшую интенсивность и маскирует большую часть отражений, что связано с тем, что именно эта линия ПВ была начата двумя судами одновременно. В дальнейшем, в результате разворотов судов, шум начинает проявляться во всем временном пространстве сейсмограмм. Таким образом, интерференционный шум характеризуется как:

- высокоамплитудный в верхних временных интервалах
- пространственно-вариативный и случайный
- проявляющийся в виде наложенных волновых пакетов и зернистой структуры
- существенно затрудняющий интерпретацию глубинных отражений

3.2. Инициализация алгоритма подавления интерференции

Для реализации алгоритма разделения были заданы пространственно-временные окна 3D F-K преобразования, а также рассчитаны значения частотно-зависимого порога для каждой итерации, на основании амплитудно-частотных характеристик данных. Размер окна составил 32 трассы по инлайну, 20 трасс по кросслайну и 200 мс по времени. Перекрывание по всем направлениям принималось равным половине длины соответствующего окна. Первоначальное значение порога для начала инверсии было рассчитано на основании максимальной амплитуды, присутствующей в данных. Минимальный же порог определялся индивидуально для каждого окна F-K преобразования. Такой подход позволил алгоритму эффективно моделировать всю амплитудно-частотную область, содержащуюся в данных. На рисунке 3.4 приведён пример отдельного окна и его F-K спектра до и после процедуры смешивания данных. На рисунке 3.5 показано распределение минимальных порогов по частотам, а также процесс их изменения в зависимости от номера итерации алгоритма. Общее количество итераций было выбрано равным 225, что обеспечило моделирование всей амплитудно-частотной характеристики исходных данных при заданной скорости снижения порога.

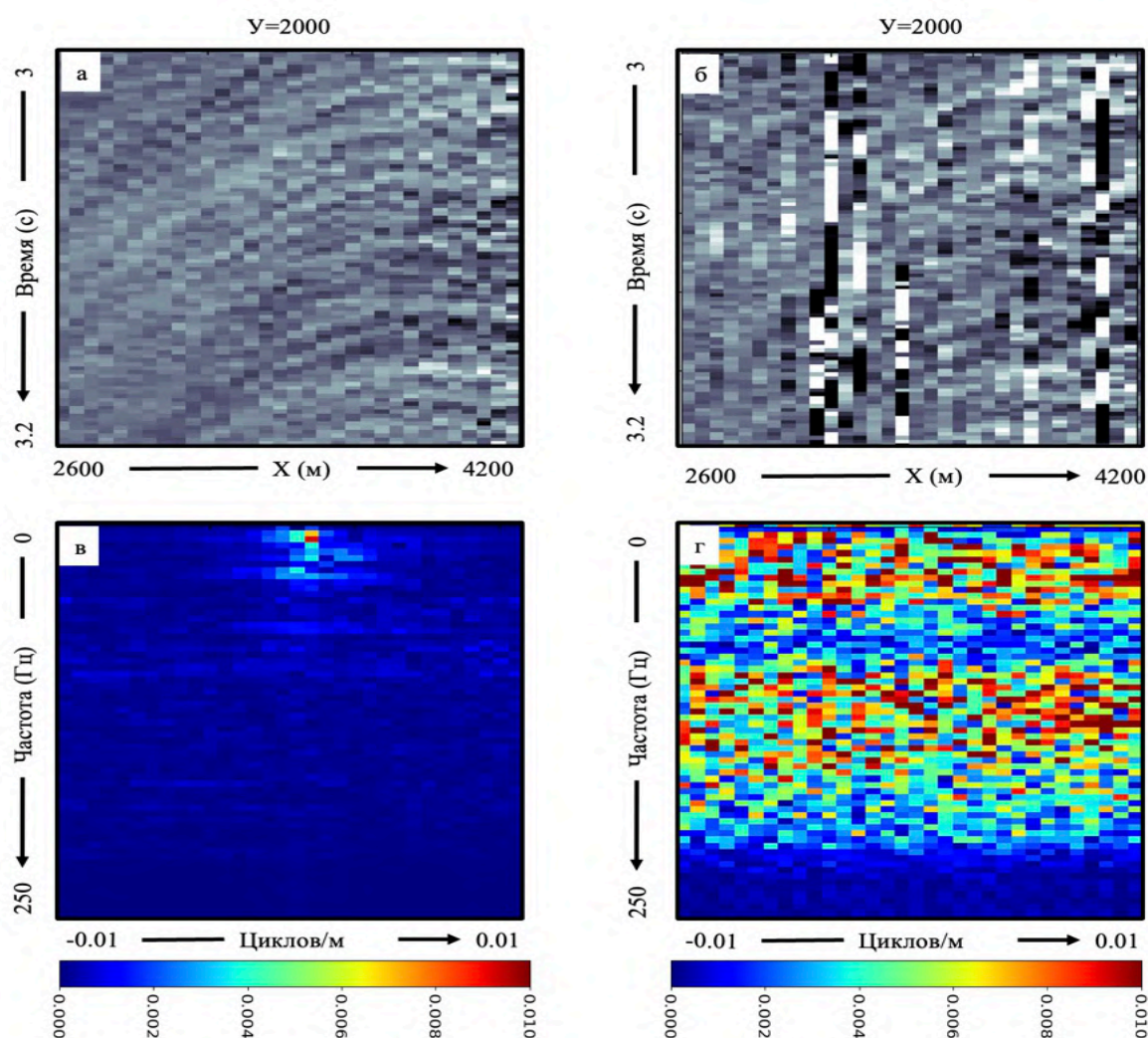


Рисунок 3.4. Отдельное окно и его F-K спектр. а, в – до смешивания. б, г – после смешивания

На временном окне, полученном до процедуры смешивания (левые панели), наблюдается классическое окно сейсмограммы. После выполнения смешивания (правые панели) структура данных существенно изменяется. Вместо четких наклонных событий появляются выраженные вертикальные артефакты, вызванные наложением сигналов от разных источников. Анализ двумерных F-K спектров показывает, что до смешивания энергия сосредоточена в узкой области спектра. После смешивания энергия распределяется по широкому диапазону частот и волновых чисел, спектр становится гораздо более «размазанным», и интерференционная помеха доминирует. Таким образом, задача алгоритма – выделить узкую когерентную часть спектра из «залитого» интерференцией фона.

После задания необходимых параметров осуществляется инициализация алгоритма. Процесс реконструкции данных начинается с восстановления событий с наибольшими амплитудами и постепенно переходит к менее выраженным сигналам. Таким образом, восстановление выполняется по принципу последовательного привлечения все более слабых компонент, что обеспечивает поэтапное уточнение модели. Иллюстрация данного процесса приведена на рисунке 3.6. На ранних этапах (20–50 итераций) реконструируются только наиболее энергетически выраженные события в верхней части разреза, тогда как слабые отражения и глубинные горизонты остаются неразличимыми. При дальнейшем увеличении количества итераций (100–150) восстанавливается основная структура волнового поля, проявляются более слабые сигналы. В диапазоне около 200 итераций достигается оптимальное соотношение между полнотой восстановления и уровнем артефактов: отражения приобретают четкую форму. При дальнейшем увеличении числа итераций (220 и более) изменения волновой картины практически отсутствуют.

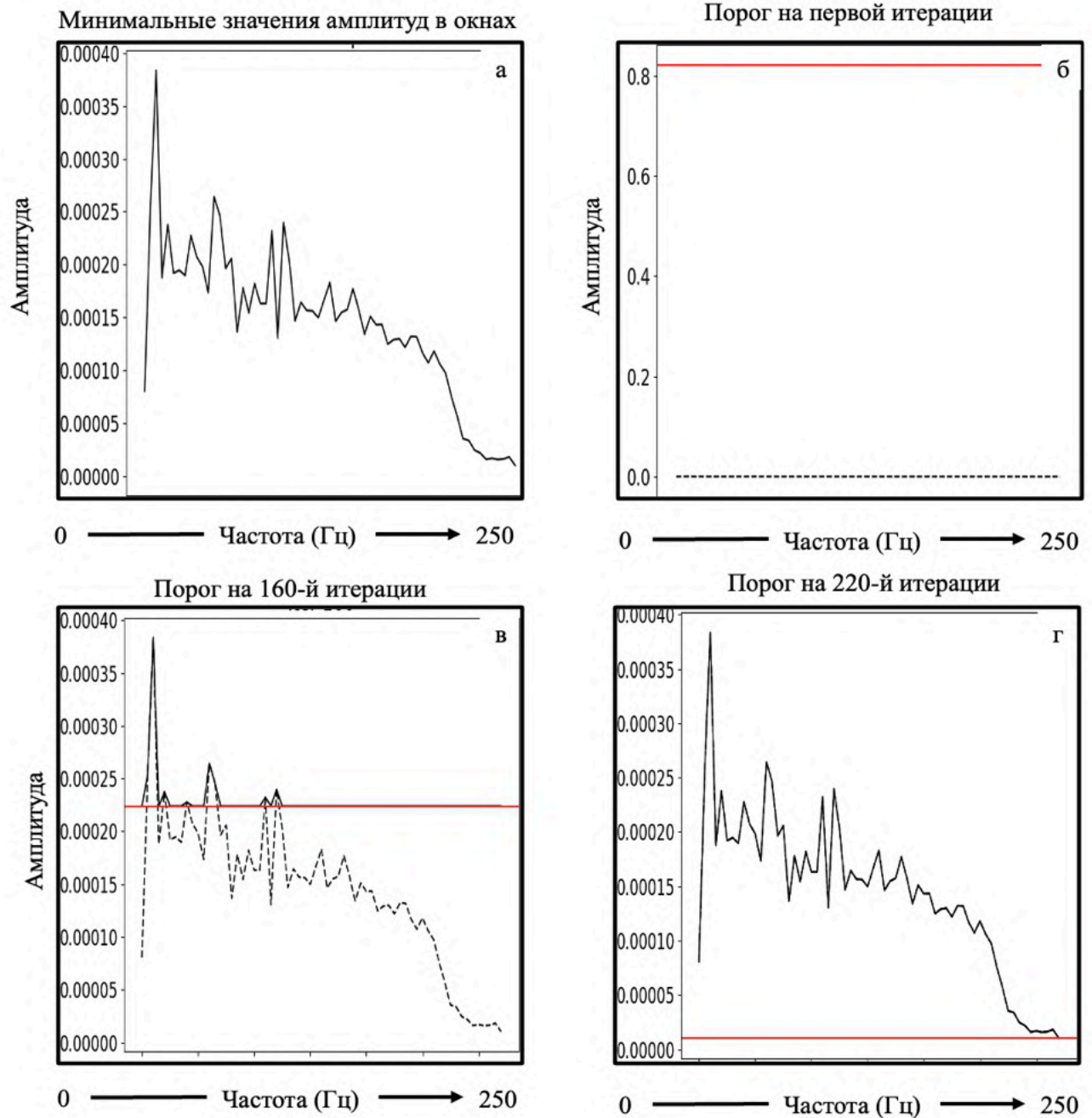


Рисунок 3.5. а – минимальные значения амплитуд в окнах F-K преобразования, б – порог на первой итерации алгоритма, в,г на 160-й и 220-й соответственно. Восстановления данных начинается с высокоамплитудных событий и постепенно снижается к наименьшим амплитудам в данных.

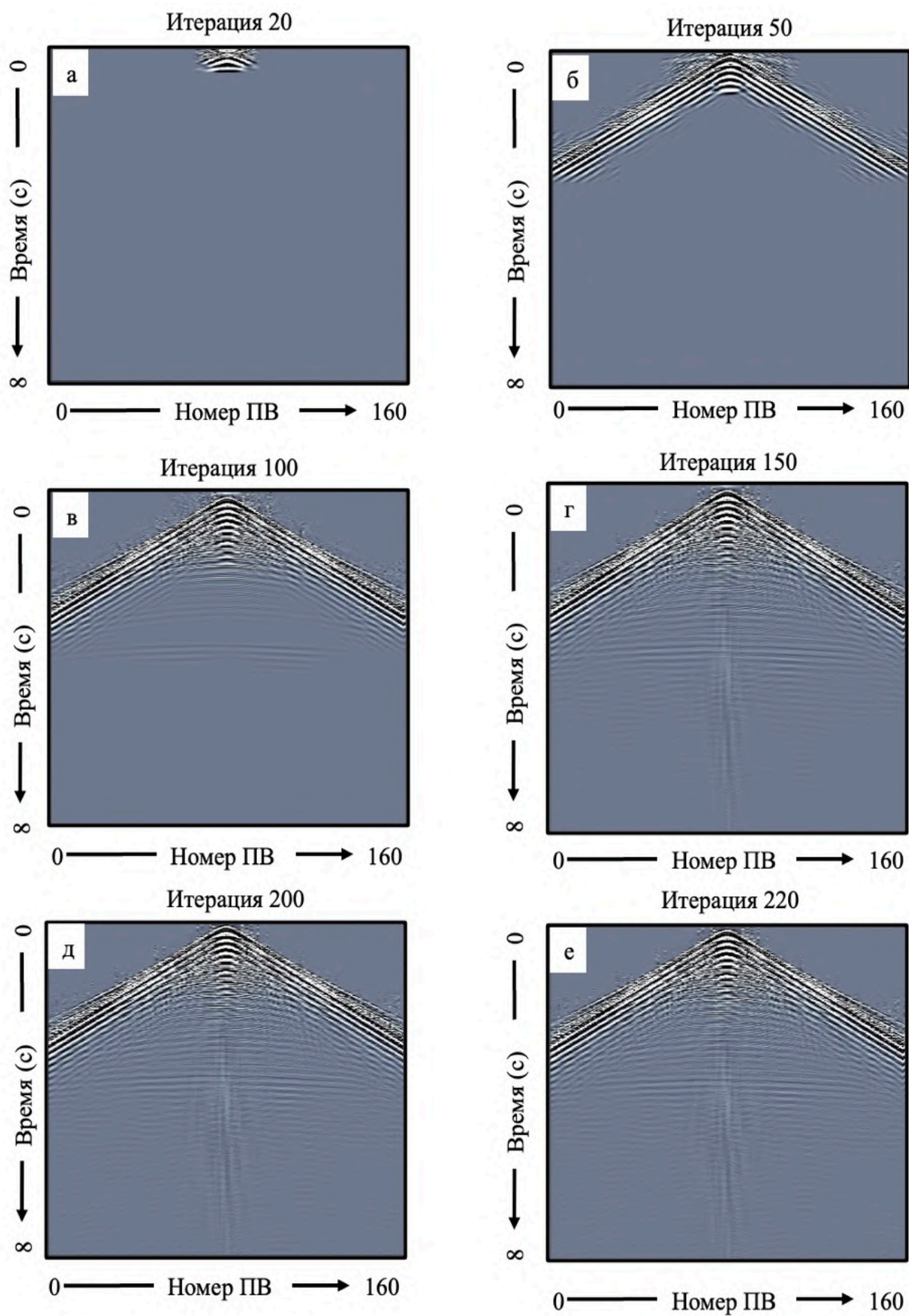


Рисунок 3.6. Иллюстрация последовательного моделирования данных на разных итерациях алгоритма

3.3. Результаты и обсуждение

На рисунке 3.7 показаны восстановленные сейсмограммы после деблендинга, а на рисунке 3.8 приведены разностные сейсмограммы, полученные вычитанием восстановленных данных из исходных. Для наглядности разностные данные были масштабированы, амплитуды увеличены в 10 раз. Очищенные сейсмограммы демонстрируют значительное подавление интерференционных сигналов и улучшение отношения сигнал/шум (ОСШ), что подтверждается приведёнными значениями: в первом случае ОСШ возросло на 22 дБ, во втором — на 16 дБ, а в третьем — на 40 дБ. При этом форма полезных отражений была сохранена, что указывает на корректность работы алгоритма. Разностные сейсмограммы позволяют более детально оценить характер подавляемых сигналов. Остаточные компоненты представлены в основном низкоамплитудным шумом, не коррелирующим с событиями полезного волнового поля. Усиление разницы в 10 раз демонстрирует, что подавление произошло по всему временному и пространственному диапазону данных, а значимых искажений полезных событий не наблюдается. Незначительные потери сигнала связаны с тем, что в ходе итераций алгоритма минимизируется квадрат евклидовой нормы остатка данных $f(m)$, то есть l_2 - норма. Это препятствует идеальному согласованию амплитуд. Таким образом, алгоритм обеспечивает эффективное подавление интерференции и восстановление исходной структуры полезного сигнала, при этом ошибка разделения носит локальный и малозаметный характер.

В дополнение необходимо отметить, что вычислительные затраты на разделение данных одной сейсмограммы 3D ОПП данного размера ($80 \times 160 \times 4000$) составили примерно 230 минут на стандартном ПК с Core-i7 и 64 Гб оперативной памяти. Для эффективного применения алгоритма требуется использование параллелизации вычислений.

На рисунке 3.9. представлены результаты анализа эффективности алгоритма разделения смешанных сейсмических данных. Верхний график (а) демонстрирует зависимость отношения сигнал/шум (ОСШ) от номера итерации алгоритма. Хорошо видно, что на начальных шагах реконструкции значение ОСШ остается низким, однако начиная примерно с 50-й итерации наблюдается его экспоненциальный рост. К 160–180-й итерации ОСШ достигает насыщения на уровне около 25 дБ, что указывает на стабилизацию качества разделения и завершение процесса восстановления полезных сигналов. Средний график (б) иллюстрирует сравнение амплитудных спектров исходных, смешанных и разделённых данных. Видно, что спектр смешанных данных (зелёная кривая) характеризуется повышенным уровнем низко- и среднечастотных составляющих, что обусловлено интерференцией сигналов. После применения алгоритма разделения спектр восстановленных данных (синяя кривая) практически совпадает со спектром исходных (чёрная кривая), что подтверждает эффективность используемого метода в широком диапазоне частот.

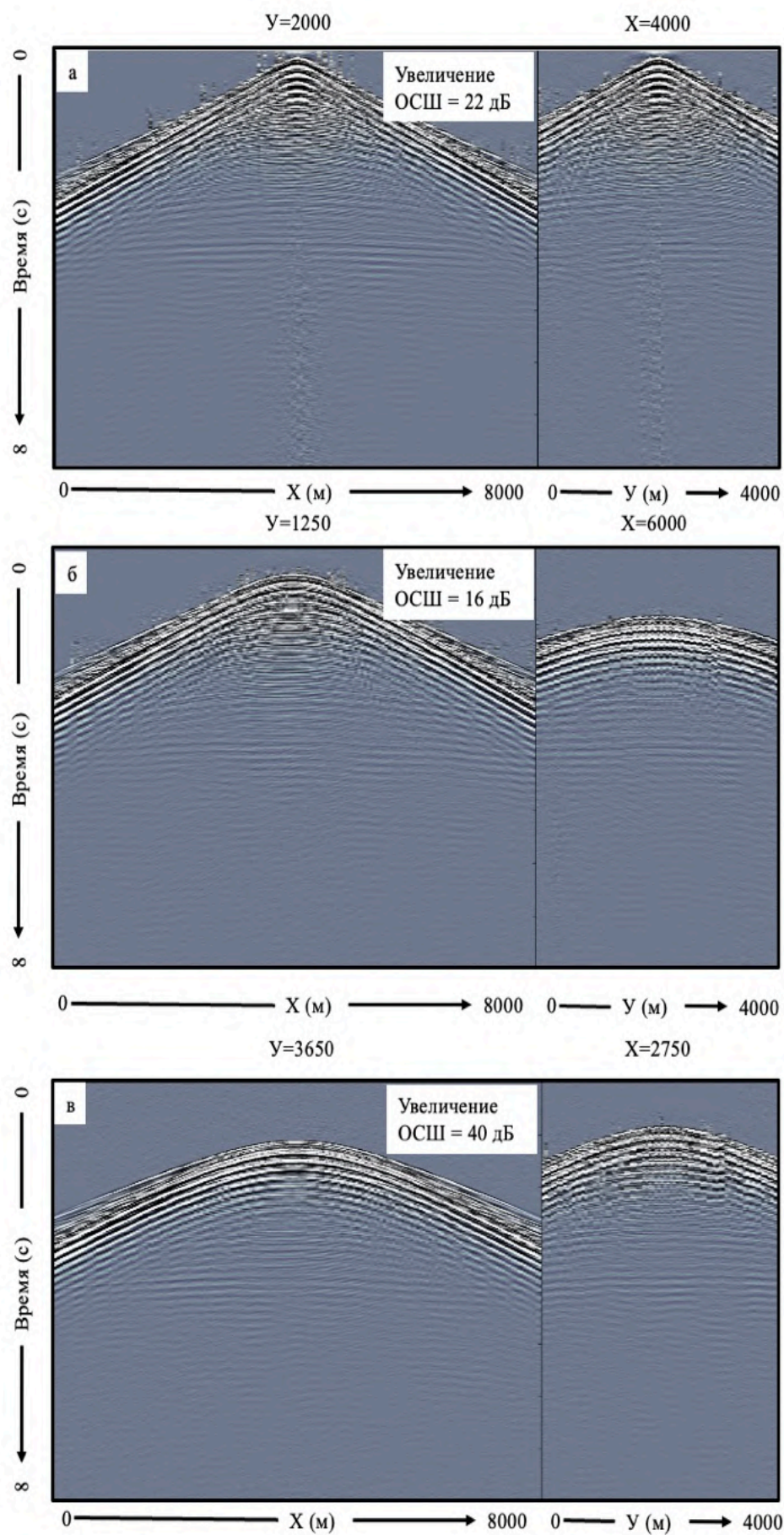


Рисунок 3.7. Результаты работы алгоритма разделения данных от перекрывающихся источников для разных инлайнов и кросслайнов

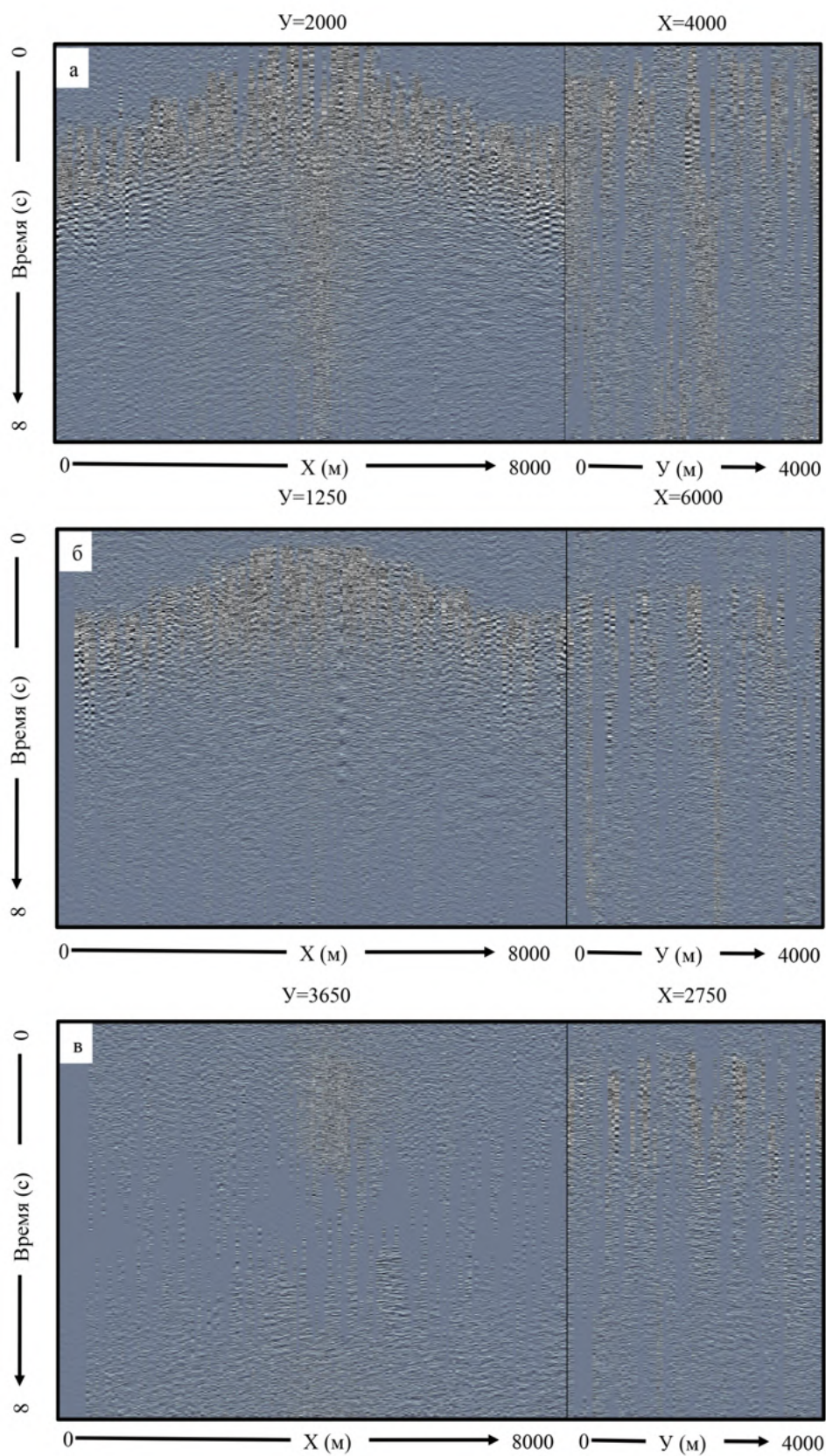
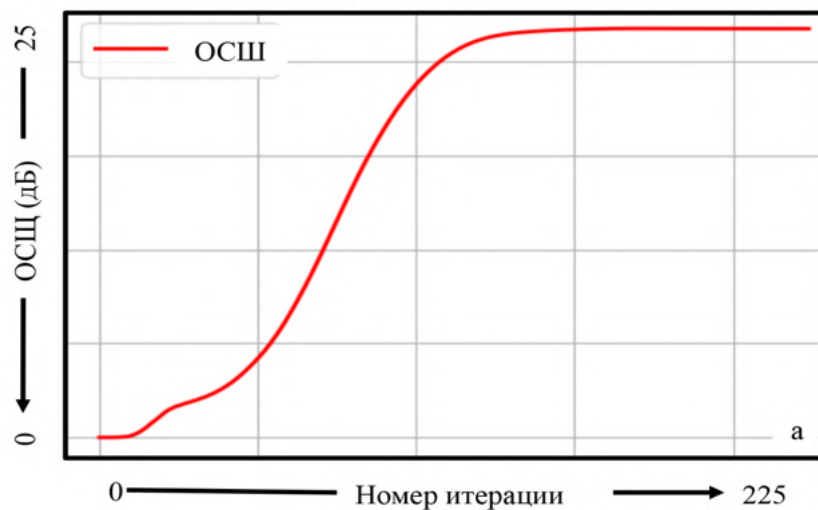


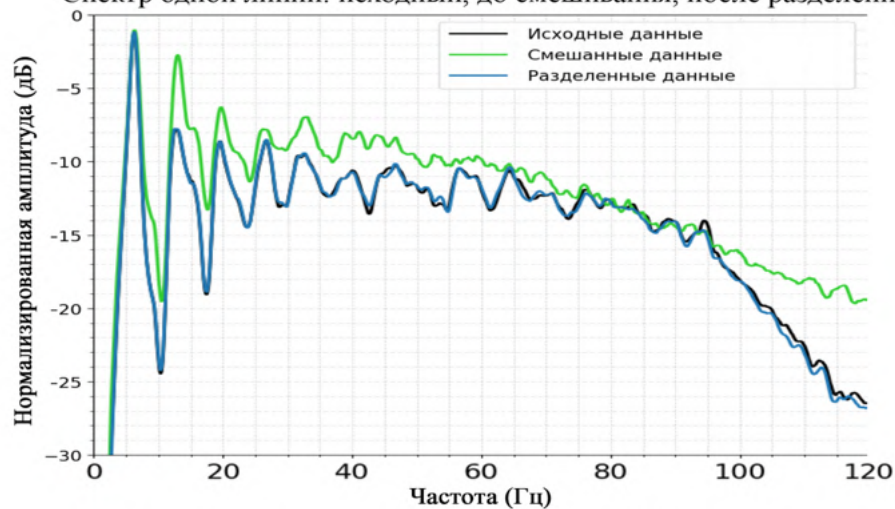
Рисунок 3.8. Разница между исходными (без шума) данными и данными после подавления шума. Разница умножена на 10.

Нижний график (в) показывает распределение ОСШ для различных кросслайнов. Красная линия соответствует ОСШ смешанных данных, синяя — разделённых, зелёная — разнице между ними. Можно отметить, что после разделения ОСШ в среднем увеличивается на 30 дБ, при этом колебания значений по кросслайнам объясняются неоднородностью структуры и различиями в исходной энергии сигналов. Данный результат демонстрирует стабильное улучшение качества данных после деблендинга. Таким образом, совокупность представленных результатов подтверждает, что разработанный алгоритм эффективно подавляет интерференцию и позволяет восстанавливать спектральные и амплитудные характеристики, близкие к исходным (разница $<1\%$), обеспечивая значительный прирост ОСШ по всему объему данных.

Соотношение сигнал/шум в зависимости от номера итерации



Спектр одной линии: исходный, до смешивания, после разделения



Соотношение сигнал/шум для разных кросслайнов

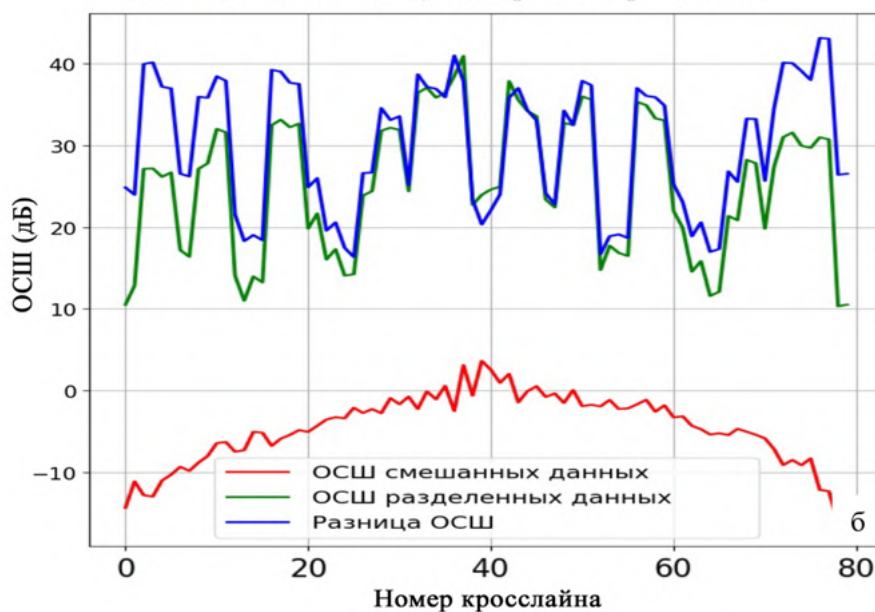


Рисунок 3.9. а – зависимость ОСШ от номера итерации для одной ОПП. б – сравнение спектров исходных, смешанных и разделенных данных. в - сравнение ОСШ смешанных данных, ОСШ разделенных данных и увеличения ОСШ для каждой линии кросслайна в исходном наборе данных

3.4. Выводы к главе 3

1. Задача подавления интерференции была сформулирована и проверена на 3D ОПП-наборе данных, синтетически смешанных по схеме «флип-флоп» с задержкой ± 1 секунда, что обеспечивает реалистичную проверку алгоритма.
2. Показано, как интерференция проявляется на сейсмограммах и в пространстве F-K. Описан механизм частотно-зависимого порога и продемонстрировано, как алгоритм последовательно восстанавливает структуру отражений.
3. Алгоритм эффективно отделяет смешанный шум от полезных отражений: средней прирост сигнал/шум составляет +30 дБ. Расхождение амплитудных спектров минимально. Существенные потери сигнала отсутствуют.
4. Проведена оценка вычислительной трудоемкости алгоритма. Время разделения тестового набора данных составило 230 минут на рабочей станции, что указывает на необходимость дополнительной оптимизации алгоритма для применения на реальных наборах данных.

Глава 4. Разделение сигналов от перекрывающихся источников на примере данных ОМР⁵

4.1. Анализ исходного набора данных

В 2022 году АО «МАГЭ» выполнены опытно-методические сейсморазведочные работы с использованием двух судов-источников: НИС «Николай Трубятчинский» («НТ») и ИС «Вячеслав Тихонов» («ВТ»). В качестве приёмной системы применялись донные станции типа «Краб», размещённые по регулярной сети с шагом 200×200 метров. Схема расположения источников имела нерегулярный характер (рисунок. 4.1). Всего было выполнено 18 линий возбуждения с межлинейным расстоянием 400 метров. На каждом проходе по профилю осуществлялись два ряда возбуждений в режиме «флип-флоп», что приводило к чередованию кросслайновых интервалов от 50 до 400 метров. Интервал между последовательными выстрелами составлял 50 метров, а дистанция между судами — около 4 км. Следует отметить, что только 12 из 18 линий выполнялись с наложением сигналов. За весь период работ для одной донной станции было зарегистрировано 6176 возбуждений, из которых 4172 содержали помехи от второго, перекрывающегося источника, тогда как 2004 ПВ были записаны без интерференции.

Анализ времен возбуждения источников

На первом этапе выполнен контроль и анализ времен возбуждения источников и исходных записей. Отмечено, что на судне «Николай Трубятчинский» времена выстрелов частично фиксировались вне сетки дискретизации сейсмической записи, что потребовало последующей корректировки. Кроме того, в исходном наборе отсутствовали метки времени возбуждений, сделанных в период проведения «софт-старта». Анализ времен возбуждения сигналов (табл. 3), показывает, что лишь в двух из шести комбинаций линий ПВ суда стартовали почти одновременно. В остальных случаях начальные сдвиги были значительно больше, что впоследствии обусловило появление дополнительного шума на сейсмограммах, связанного с выстрелами «софт-старта».

При выполнении опытно-методических работ целенаправленно аппаратная случайная задержка между выстрелами не применялась, поэтому, случайность времен возбуждения возникала только по естественным причинам. Для оценки степени случайности времен возбуждения вычислялось стандартное отклонение σ интервалов «выстрел-к-выстрелу» для каждой пары линий и каждого источника.

⁵При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ отражены основные результаты, положения и выводы исследования: Литвачук А.В., Казанин Г.А., Казанина М.А., Шепелев А.А., Сафонов Д.А. Разработка и практическая реализация алгоритма деблендинга с использованием SDK Альтаир-М // Приборы и системы разведочной геофизики № 2 (85). 2025 С. 66–71. EDN: KVMYTI (0,69 п.л., вклад автора 55 %). Импакт-фактор 0,056 (РИНЦ)

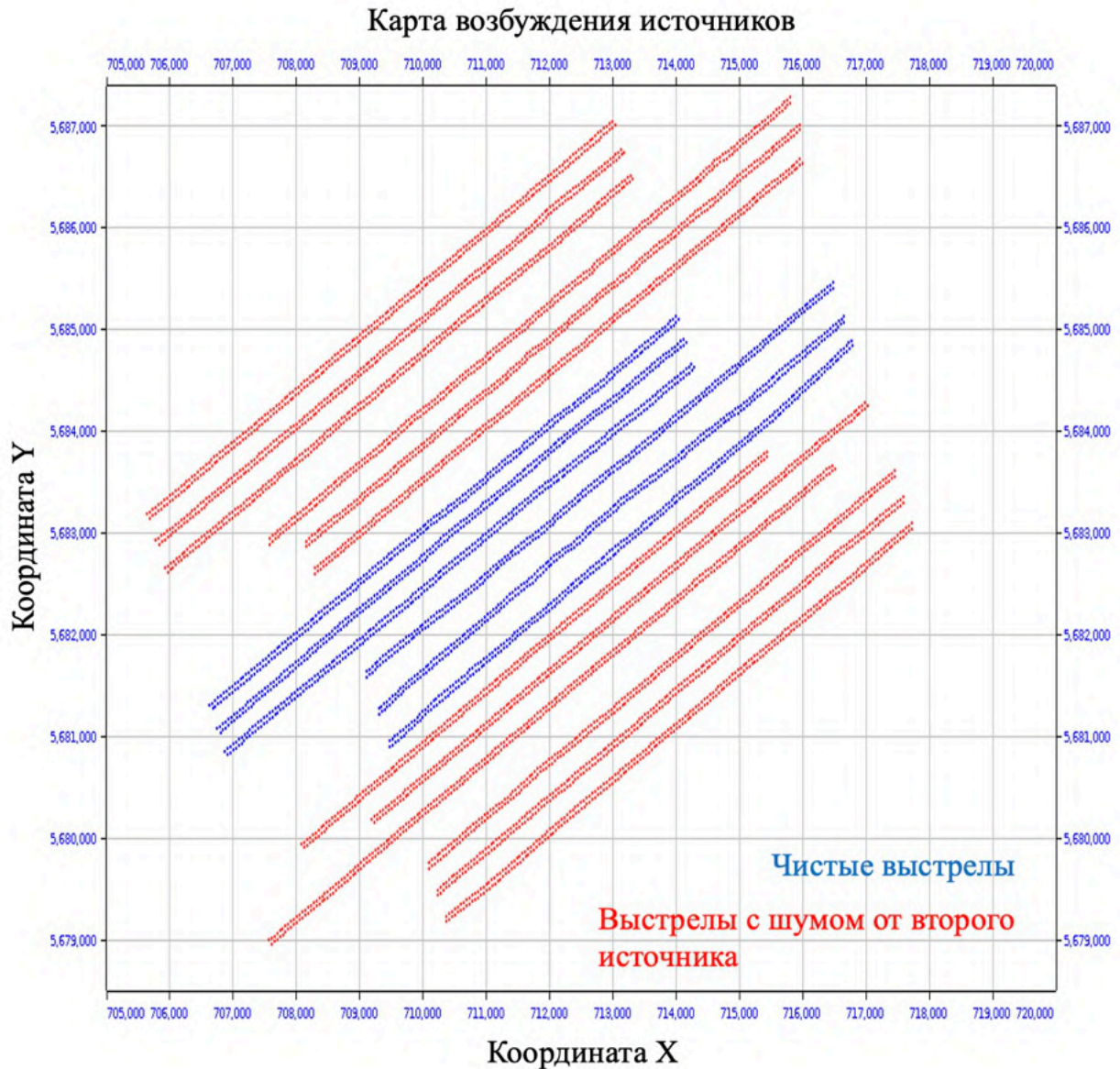


Рисунок 4.1. Карта возбуждения источников во время опытно-методических работ



Методика возбуждения сигнала:

- Судно 1 (И1), (И2) и судно 2 (И3), (И4) стреляют двумя источниками попеременно, каждые 50 метров (флип-флоп)
- Только естественная задержка между выстрелами
- Движение судов как в противоположном так и одном направлении
- Расстояние между судами 4000 метров
- Отработка профилей начиналась практически одновременно

Рисунок 4.2. Методика возбуждения сигнала на опытно-методических работах

Таблица 3. Анализ времен возбуждения сигналов

№ комбинации линий ПВ	Время между первыми выстрелами судов на линии, сек	Вячеслав Тихонов		Николай Трубяччинский		Среднее σ по комбинации (среднее $i1+i2+i3+i4$)
		№ Источинка	σ , сек	№ Источинка	σ , сек	
2714-2554	428	И1	0.367	И3	0.743	0.576
		И2	0.367	И4	0.827	
2510-2670	107	И1	0.328	И3	0.569	0.450
		И2	0.328	И4	0.576	
2726-2566	25	И1	0.463	И3	0.677	0.592
		И2	0.463	И4	0.767	
2522-2682	162	И1	0.363	И3	0.831	0.593
		И2	0.364	И4	0.813	
2738-2578	13	И1	0.256	И3	0.866	0.559
		И2	0.254	И4	0.858	
2534-2694	685	И1	0.431	И3	0.474	0.460
		И2	0.433	И4	0.503	
		Среднее σ ВТ	0.368	Среднее σ НТ	0.709	

По величине стандартного отклонения σ суда-источники вели себя по-разному: средний разброс интервалов у судна «ВТ» составил 0.368 с, когда как на судне «НТ» 0.709 с. При сравнении с величиной стандартного отклонения, возникающего при создании последовательности случайных выстрелов на основании равномерного распределения (см. табл. 2), данные величины соответствуют ориентировочным смещениям $\mu \pm 0.35$ с для судна «ВТ» и ± 0.8 для судна «НТ». Полученные значения в общем случае удовлетворяют критериям «минимальной случайности», основанным на ограничении Цзяна. Такая относительно высокая величина естественных случайных смещений, вероятно, связана со сложными гидро и метеорологическими условиями в районе проведения работ, на восточном шельфе острова Сахалин, который известен своими переменчивыми течениями, что являлось большой удачей в контексте проведения опытных работ с перекрывающимися источниками. Существенная же разница в случайности между судами может быть обоснована двумя факторами. Первый фактор – конструкция судов, НТ является более валким судном, по сравнению с ВТ, что привело к меньшей стабильности судна на профилях. Второй фактор – точность определения позиции пневмоисточников на момент выполнения работ на судне НТ было установлено по одному RGPS приемнику на одну линию ПИ, когда как на ВТ приемники были установлены как в начале, так и в конце линии ПИ (по два на линию), что увеличивало точность определения позиции выстрела, и следовательно, уменьшало разброс.

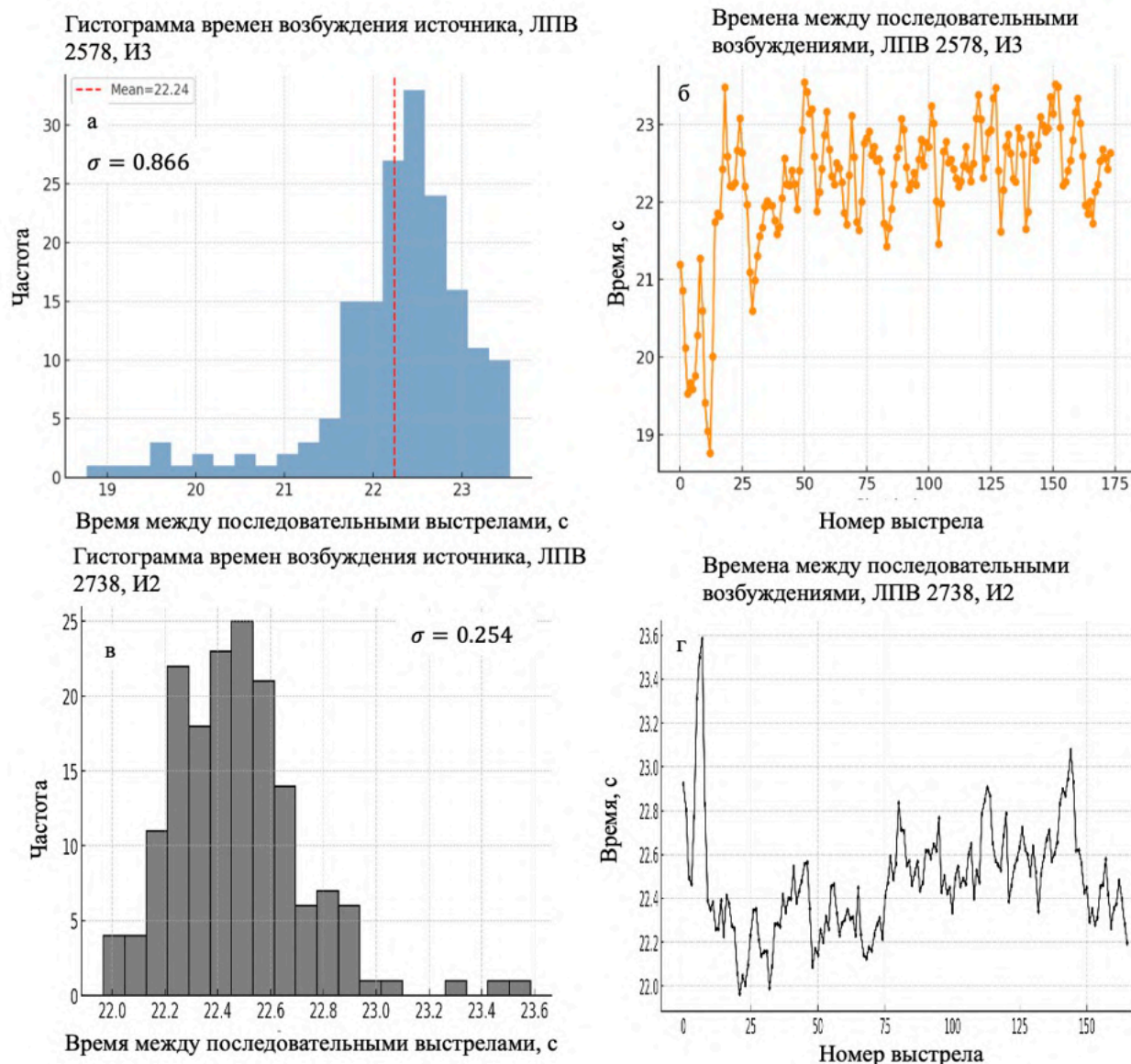


Рисунок 4.3. Гистограммы и времена между последовательными возбуждениями для двух разных линий возбуждения: а,б – судно «Николай Трубытчиский», в, г – судно «Вячеслав Тихонов»

В дополнение к статистическому анализу времен возбуждения по комбинациям линий был выполнен детальный анализ последовательностей времен выстрелов для двух участков наблюдений (рисунок 4.3). Первая последовательность (рисунок 4.3 а, б) характеризуется значительным разбросом значений: времена выстрелов колеблются от 18.7 с до 23.5 с. Среднее значение составило порядка 22.4 с, стандартное отклонение $\sigma \approx 0.866$ с, что эквивалентно равномерному случайному смещению порядка ± 1 с. Гистограмма распределения имеет близкую к нормальной форму, но с заметной асимметрией в «хвостах», что свидетельствует о достаточно выраженной случайности интервалов. Вторая последовательность (рисунок 4.3 в, г) оказалась более регулярной. Диапазон колебаний составил 21.9–23.6 с при среднем значении около 22.5 с. При этом стандартное отклонение было невелико — $\sigma \approx 0.225$ с, что соответствует эквивалентному джиттеру всего ± 0.3 с. Гистограмма распределения носит узкий

колоколообразный характер, без выраженных «хвостов». Таким образом, можно заключить, что первая последовательность обеспечивает более высокую степень случайности времен возбуждения, достаточную для эффективного подавления интерференции в задаче деблендинга. Вторая последовательность, напротив, характеризуется ограниченным диапазоном вариаций, что потенциально может ухудшать устойчивость алгоритмов разделения сигналов в условиях сильного перекрытия источников.

В совокупности результаты статистического и локального анализа показывают, что фактическая случайность времен возбуждения формировалась не равномерно и была неодинакова для судов. Случайность была сформирована исключительно благодаря естественным причинам и является достаточной для применения алгоритма разделения сигналов от перекрывающихся источников.

Геометрия опытно-методической съемки

Прежде чем перейти к подавлению интерференции, отметим особенности геометрии ОМР. Как видно на рисунке 4.1, сеть источников нерегулярна: число пунктов возбуждения на линиях различается. Поскольку используемое разделение опирается на 3D F–K-преобразование, корректная работа которого в общем случае предполагает регулярную выборку, все линии были приведены к единому числу ПВ (240) путём добавления нулевых трасс.

В поперечном (кросслайн) направлении изменения не вносились, несмотря на нерегулярное чередование интервалов межлинейного расстояния: 50-400-50 метров соответственно. Такое решение было принято потому, что независимо от того, равномерна ли дискретизация по пространству или содержит отклонения, применение прямого и обратного преобразования Фурье остаётся возможным. В этом случае восстановление сигнала выполняется корректно, хотя при нарушении условий пространственной дискретизации могут возникать утечки энергии. Ключевым фактором для эффективности методов пороговой фильтрации в области F-K является когерентность спектров. Даже при наличии пространственного алиасинга спектральная энергия остаётся когерентной, хотя и смещённой в спектральной области. Таким образом, использование 3D FK-преобразования и последующей пороговой обработки остаётся оправданным, поскольку данные в целом обладают достаточной когерентностью в трёхмерном представлении. Это объясняет, почему процедуры трёхмерного F-K-преобразования могут работать и при нерегулярной сети возбуждений: несмотря на утечки энергии, связанные с нарушением условий пространственной дискретизации, когерентность сохраняется, что позволяет успешно применять методы разделения сигналов.

Кроме того, при проведении производственных полевых работ с перекрывающимися источниками необходимо строго соблюдать требования к равномерному распределению линий возбуждений по площади. Нерегулярность сети может существенно осложнить задачу

разделения сигналов, так как методы на основе F-K преобразования изначально предполагают равномерную дискретизацию. Вместе с тем фазовые сдвиги, возникающие между последовательными возбуждениями в режиме «флип-флоп» (так называемая «шахматная сетка»), как правило, оказываются достаточно малы и не приводят к существенным искажениям спектрального представления. Такие сдвиги могут быть эффективно компенсированы предварительной фазовой коррекцией исходных данных либо использованием модифицированных алгоритмов неравномерного F-K преобразования.

В целом, несмотря на наличие определённых ограничений, связанных с нерегулярной геометрией сети возбуждений и варьирующимся числом ПВ на линиях, проведённые преобразования и корректировки позволили обеспечить возможность применения 3D F-K метода для разделения сигналов. Когерентность сейсмических данных в пространственно-частотной области делает такие подходы достаточно надёжными даже в условиях отклонений от строгих требований равномерной дискретизации. Таким образом, предварительный анализ геометрии эксперимента и предпринятые меры по приведению данных к регулярной форме создают основу для успешного применения алгоритма подавления интерференции.

Анализ исходных сейсмограмм

На рисунке 4.4 представлена геометрия съемки после расширения исходного массива данных с добавлением нулевых трасс и показано расположение линий ПВ, используемых для дальнейшего анализа. В свою очередь на рисунках 4.5 и 4.6, приведены сейсмограммы, полученные после псевдо-деблендинга исходной непрерывной записи (применение оператора Γ^H). Максимальная кратность смешивания данных равна двум.

Характер шума на всех представленных сейсмограммах однотипен и проявляется в виде волнообразных пакетов, распределенных по всей временной длине записи. На кросслайновых разрезах доминируют отдельные почти вертикальные полосы, идущие сверху вниз. Отдельно отметим линию 2566 (рисунок 2.6), где зафиксировано наибольшее стандартное отклонение времен возбуждения источников $\sigma=0.592$ с. Для этой линии, помимо общей «пакетной» структуры, начинают проявляться горизонтальные полосы с небольшим уклоном, протяженностью несколько трасс. Такая структура шума согласуется с ожидаемым шумом при съемке с перекрывающимися источниками при введении дополнительной аппаратной задержки – формированием слабонаклонных, квазигоризонтальных пачек (рисунок. 1.17а)

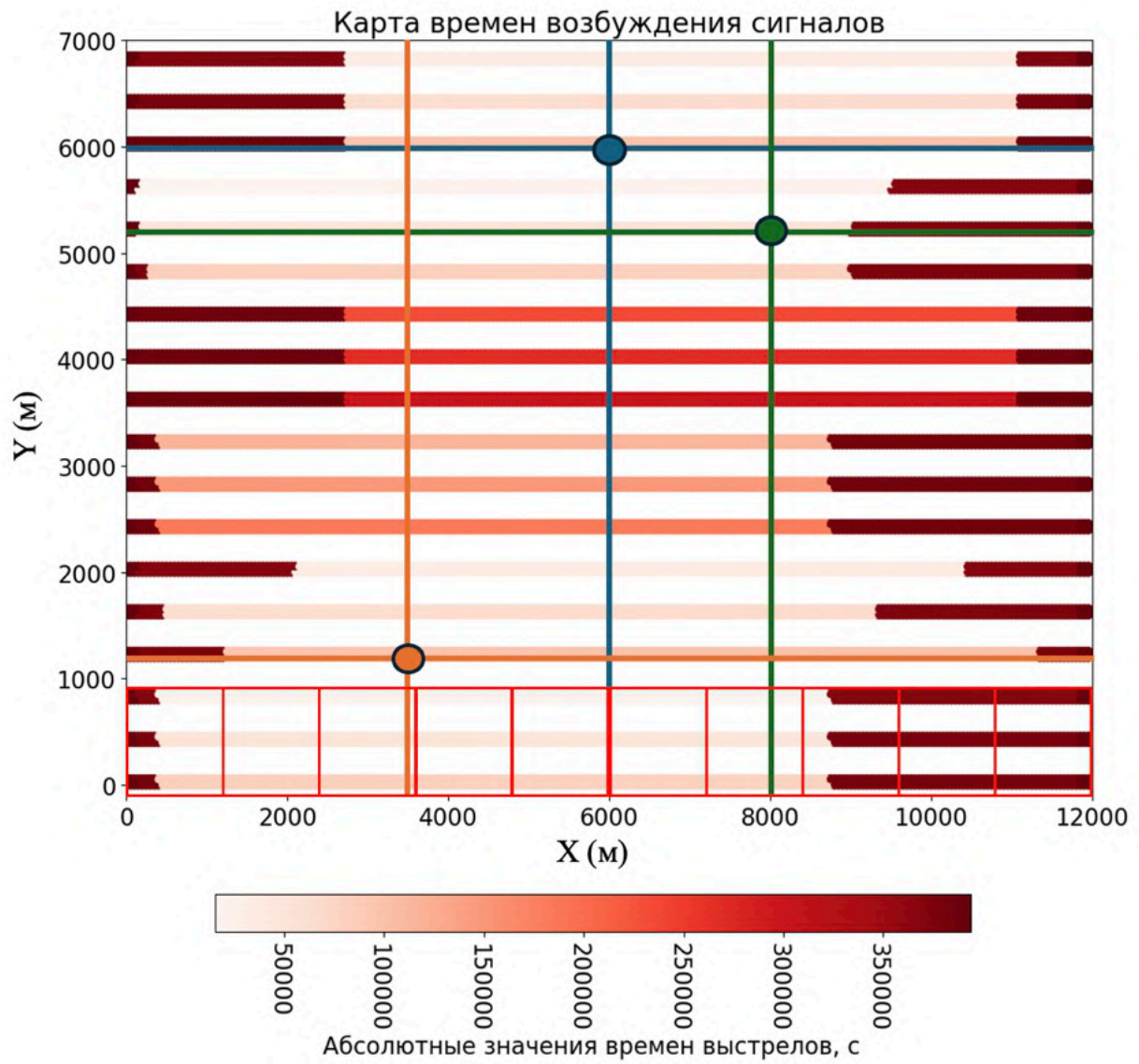


Рисунок 4.4. Карта времен возбуждения сигналов, дополненная нулевыми ПВ (бордовый цвет).

Пересечениями обозначены сейсмограммы, используемые для визуализации. Красными квадратами показаны окна F-K преобразования (без учета перекрытия)

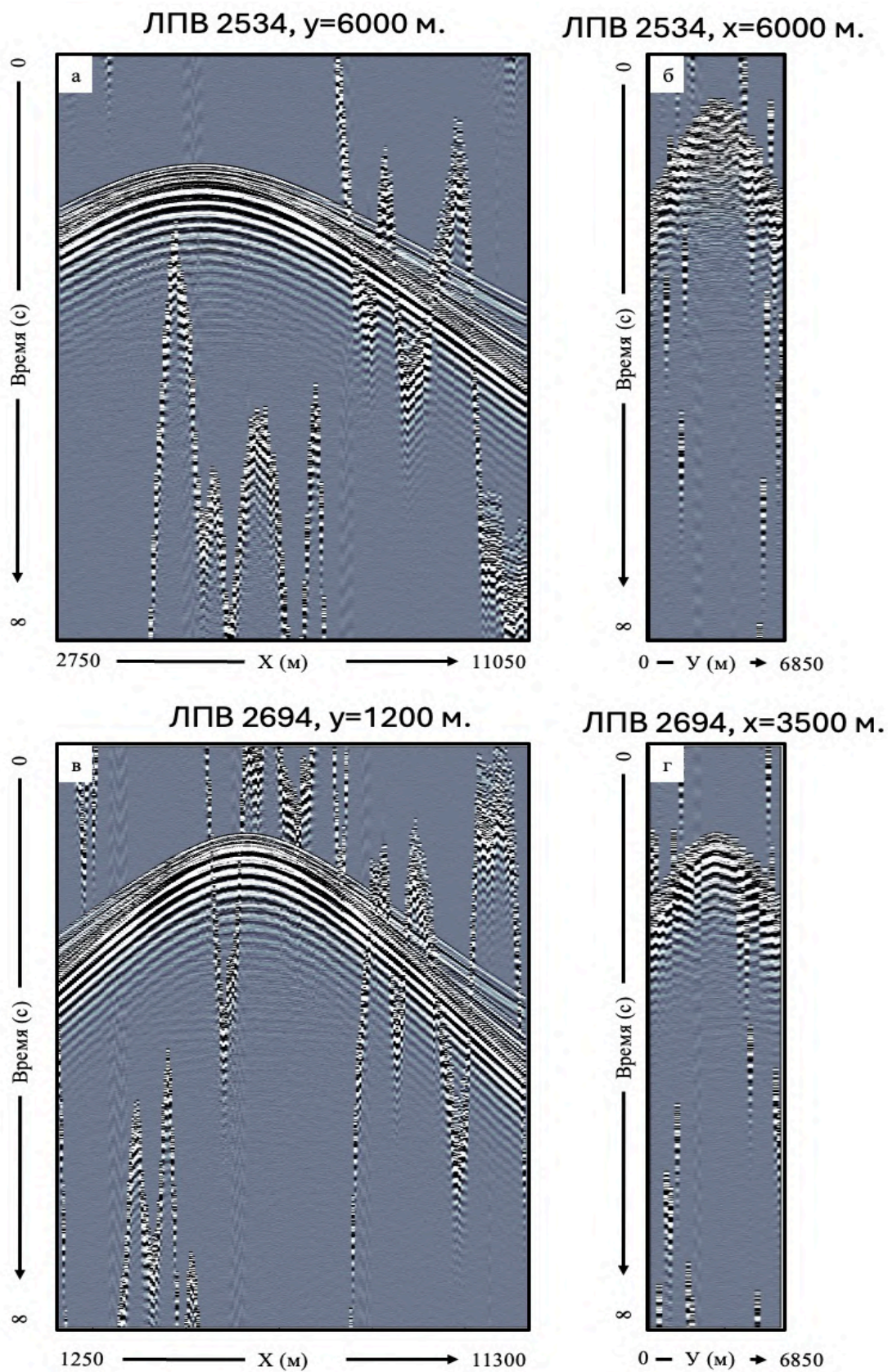


Рисунок 4.5. Пример сейсмограмм псевдо-деблендинга синего (а,б) и оранжевого пересечения (в,г), обозначенного на рисунке 4.4.

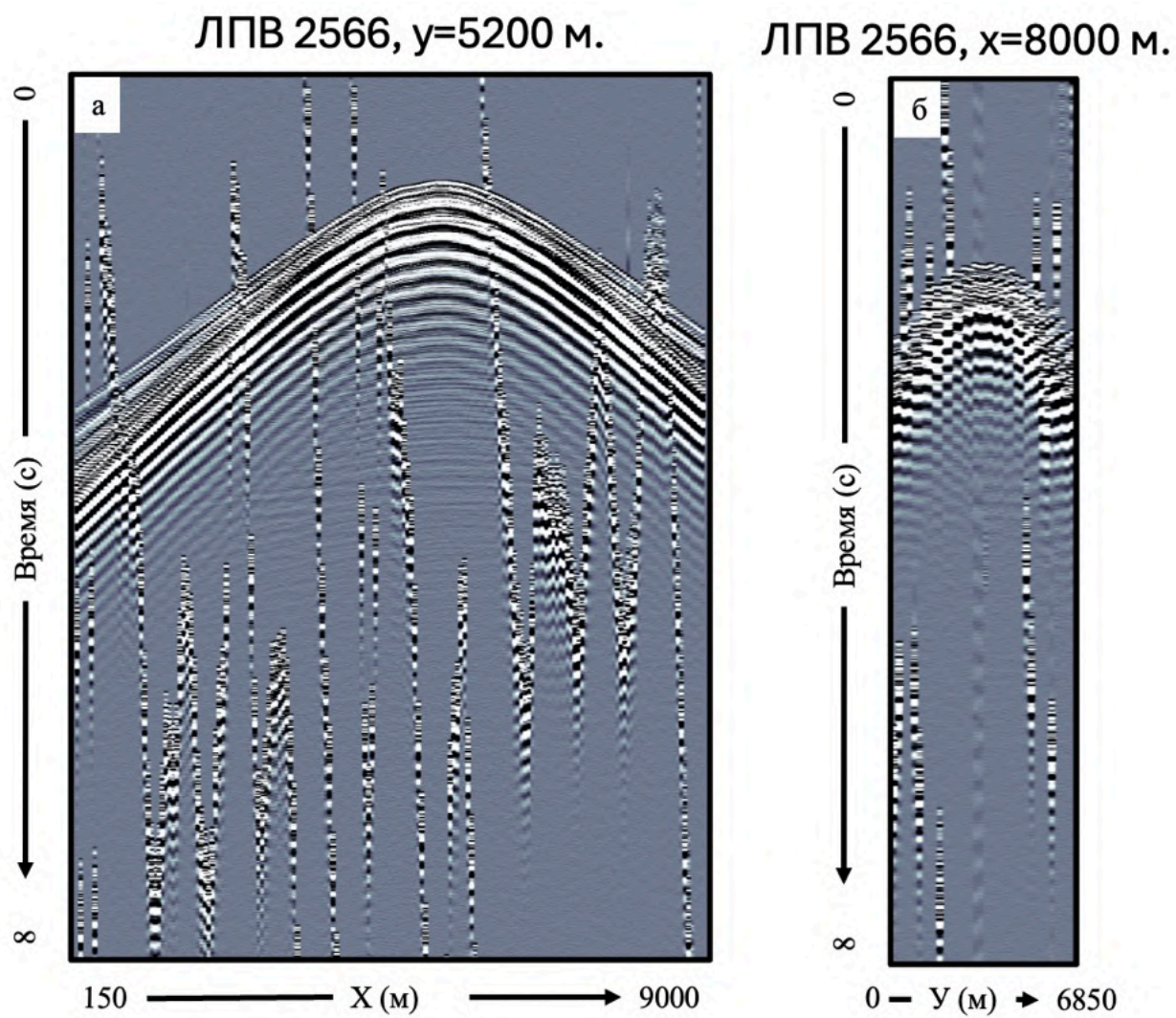


Рисунок 4.6. Пример сейсмограмм псевдо-деблендинга зеленого пересечения

4.2. Подавление интерференции и анализ результатов

Для инициализации алгоритма деблендинга было использовано окно F–K-преобразования (красные прямоугольники на рисунке 4.4) размером 6×24 трасс (кросслайн \times инлайн). Перекрытие окон по кросслайну отсутствовало из-за ограниченного объёма данных (всего 36 кросслайнов), тогда как по инлайну составляло 12 трасс. Такой выбор по кросслайну привёл к тому, что «чистые» (без помех) данные кросслайнов 13–24 не попадали в обрабатываемые окна, что усложнило задачу разделения сигналов. Отметим, что часть окон захватывает нулевые трассы; как будет показано далее, это приводит к утечке сигнала. Частотно-зависимый порог был выбрано на основе минимальных и максимальных амплитуд в окнах F–K преобразования (аналогично синтетическому примеру в главе 3). Количество итераций инверсии установлено 225.

На рисунках 4.7–4.9 представлены результаты подавления интерференции. В целом во всех случаях достигнуто заметное снижение шумовой составляющей при сохранении фазово-амплитудной структуры первичных событий, а выраженных потерь полезного сигнала не наблюдается. На рисунке 4.7 фиксируется локальная утечка полезной энергии на одном краю, обусловленная тем, что окно F–K преобразования частично захватывало нулевые трассы. На рисунках 4.8–4.9 заметны остатки неподавленной интерференции на периферии сейсмограмм. Их природа связана с выстрелами процедуры «софт-старт» - времена этих возбуждений отсутствовали в исходных данных, поэтому они не были учтены в модели смешивания и не подлежали подавлению. Дополнительным подтверждением служит линия ЛПВ 2694, где старт судов был разнесен на 685 с и на которой наблюдается наибольшее количество неподавленного шума. Полученные результаты подтверждают применимость предложенного метода инверсии для подавления интерференции: первичные события сохраняются, интерференция преимущественно удалена, а выявленные артефакты имеют технологическую природу.

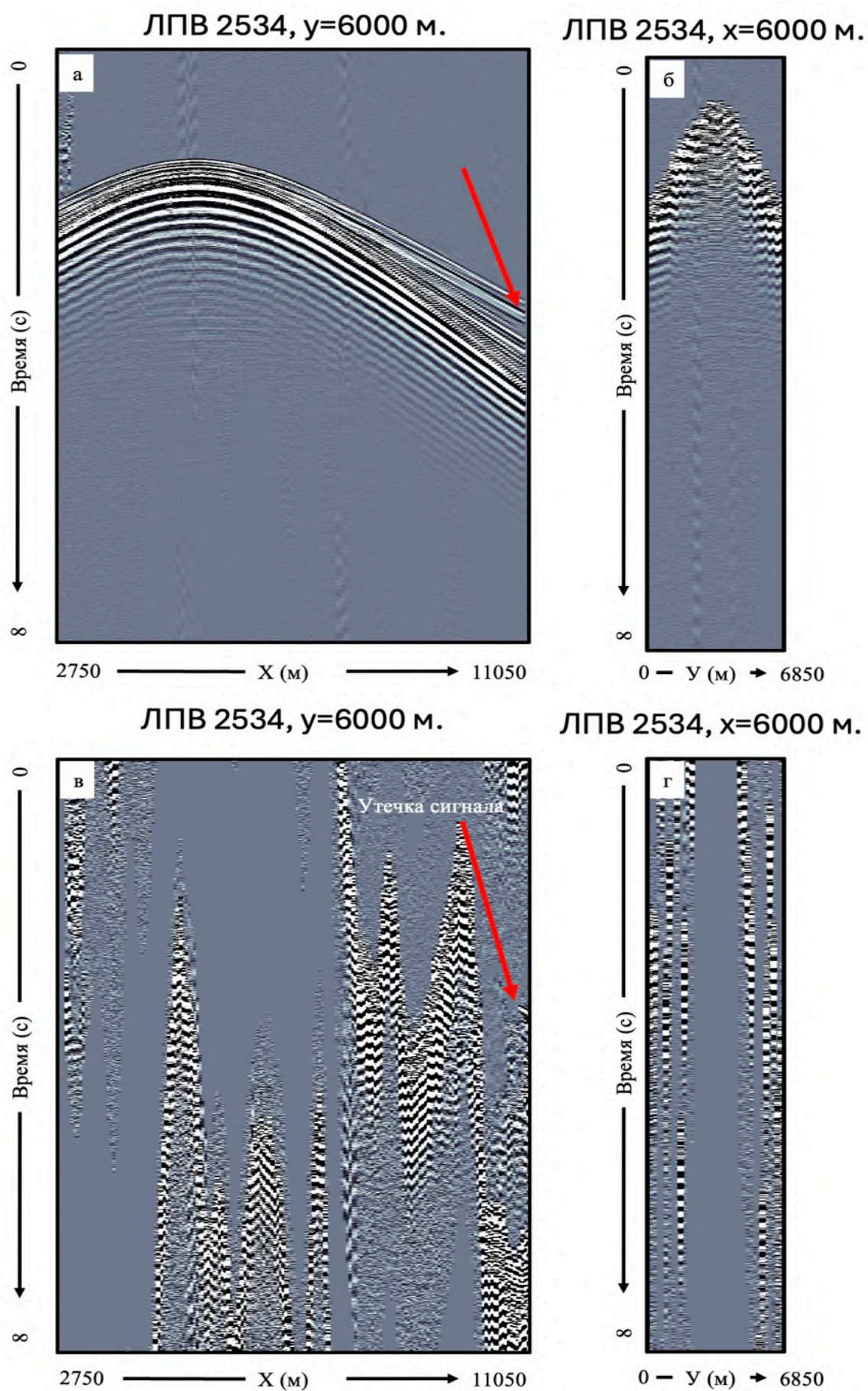


Рисунок 4.7. Результаты подавления интерференции (а, б) ЛПВ 2534 (синее пересечение); в, г – разностная сейсмограмма (амплитуды умножены на 10)

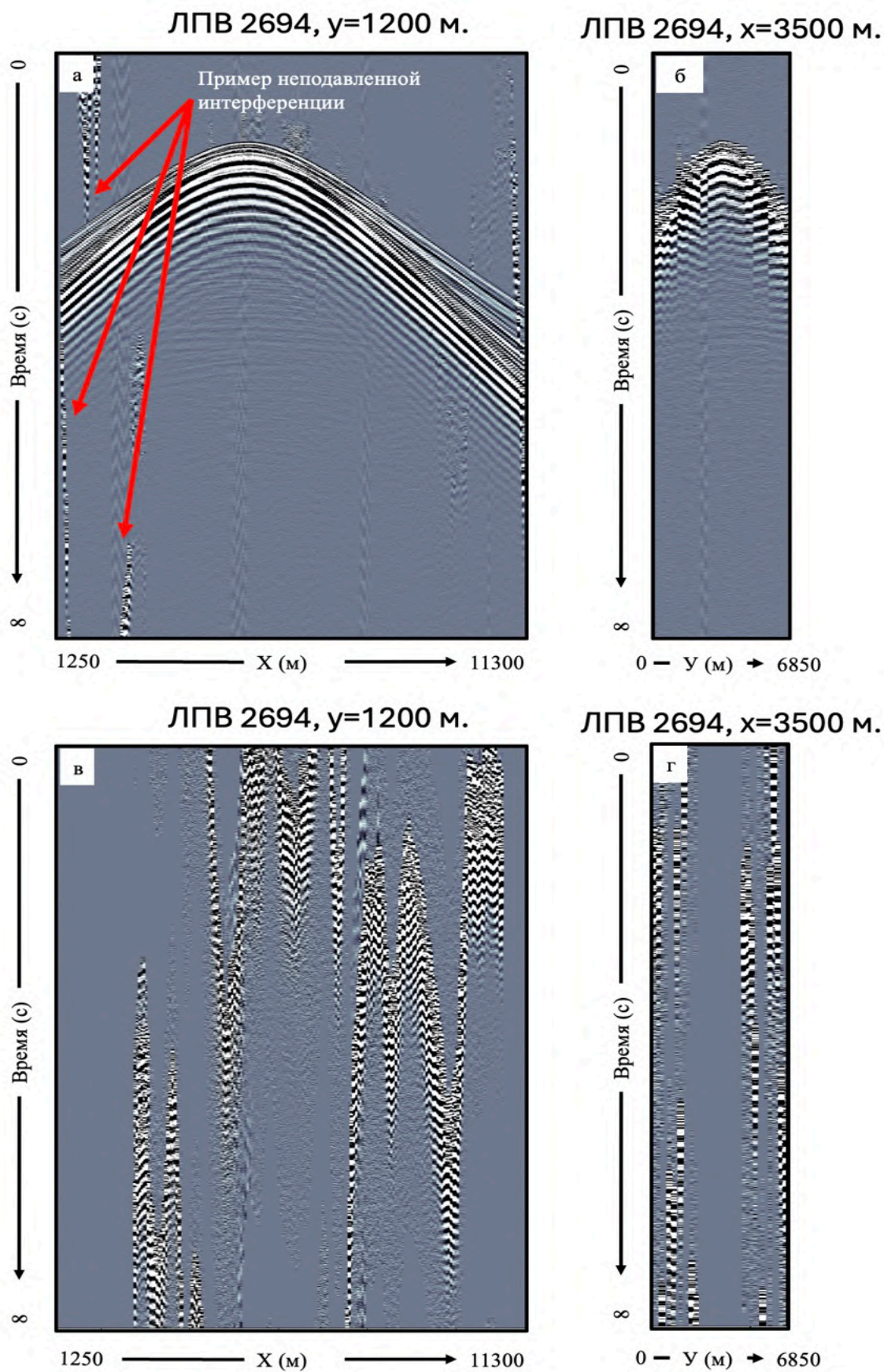


Рисунок 4.8. Результаты подавления интерференции (а, б) ЛПВ 2694 (оранжевое пересечение)
в,г – разностная сейсмограмма (амплитуды умножены на 10)

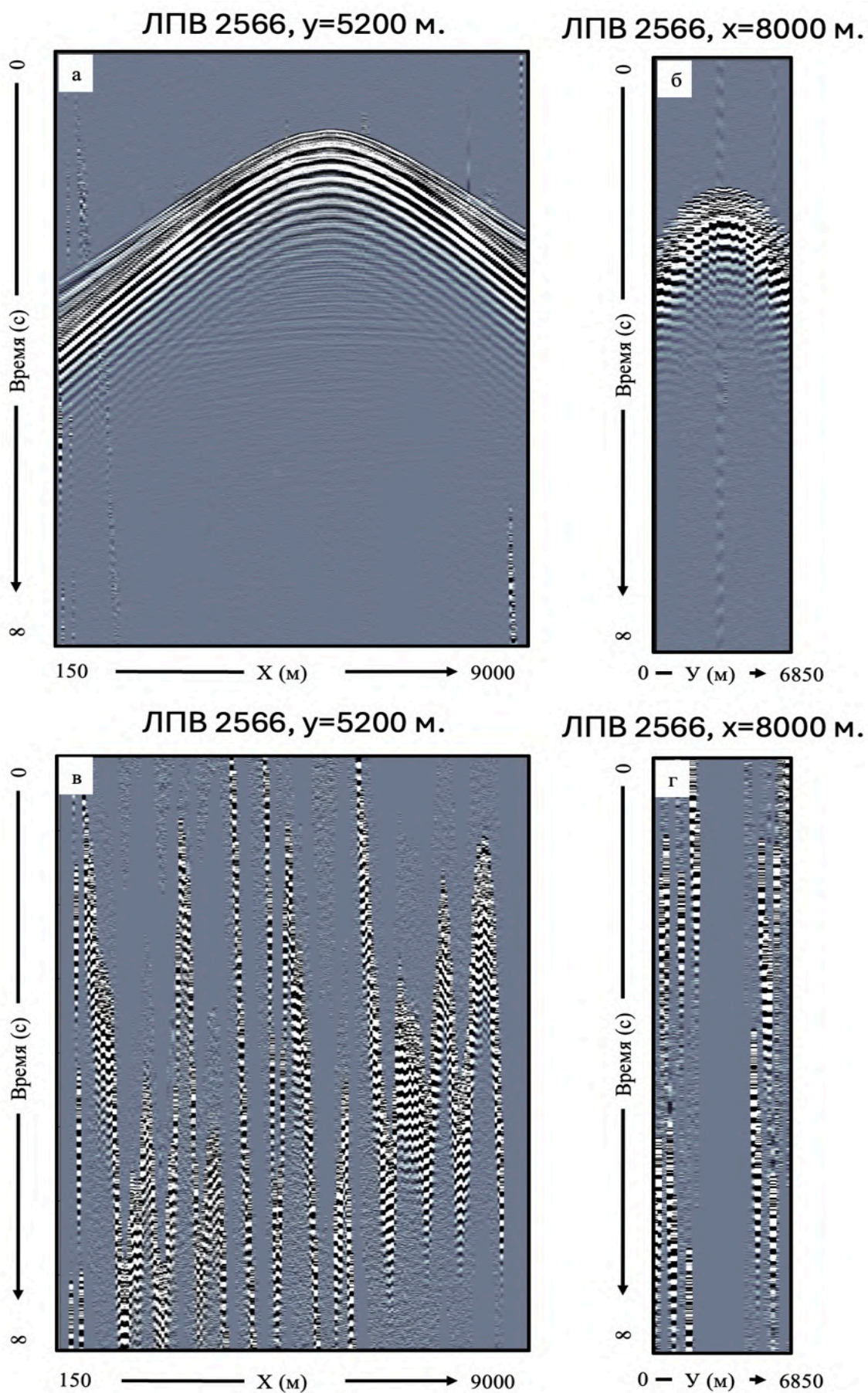


Рисунок 4.9. Результаты подавления интерференции (а, б) ЛПВ 2566 (зеленое пересечение); в, г — разностная сейсмограмма (амплитуды умножены на 10)

В дополнение был проведен спектральный анализ результатов, полученных на линии возбуждения 2566. На рисунке 4.10 (а) представлены спектры до и после подавления шума. Кривые спектров до и после практически совпадают во всей полосе частот. Наблюдается лишь небольшое сглаживание и ослабление спектра на верхних частотах, что указывает на минимальные потери полезного сигнала. В представлении F-K (рисунк 4.10) наблюдается снижение энергии вне конуса скоростей. Спектр становится компактнее и согласованнее, амплитуды полезного сигнала возрастают. На разностном спектре (рисунк 4.10в) отсутствуют признаки полезного сигнала и наблюдаются лишь горизонтальные полосы, распределенные по всей полосе частот, характерные для шума от смешивания источников. Далее был проведен полосовой разбор результатов по всей полосе частот (рисунк 4.11, рисунок 4.12). На всех представленных панелях отсутствуют признаки подавления сигнала, а интерференция была успешно подавлена. Основываясь на результатах данного анализа, можно заключить, что представленный алгоритм успешно справился с подавлением шума от перекрывающихся источников.

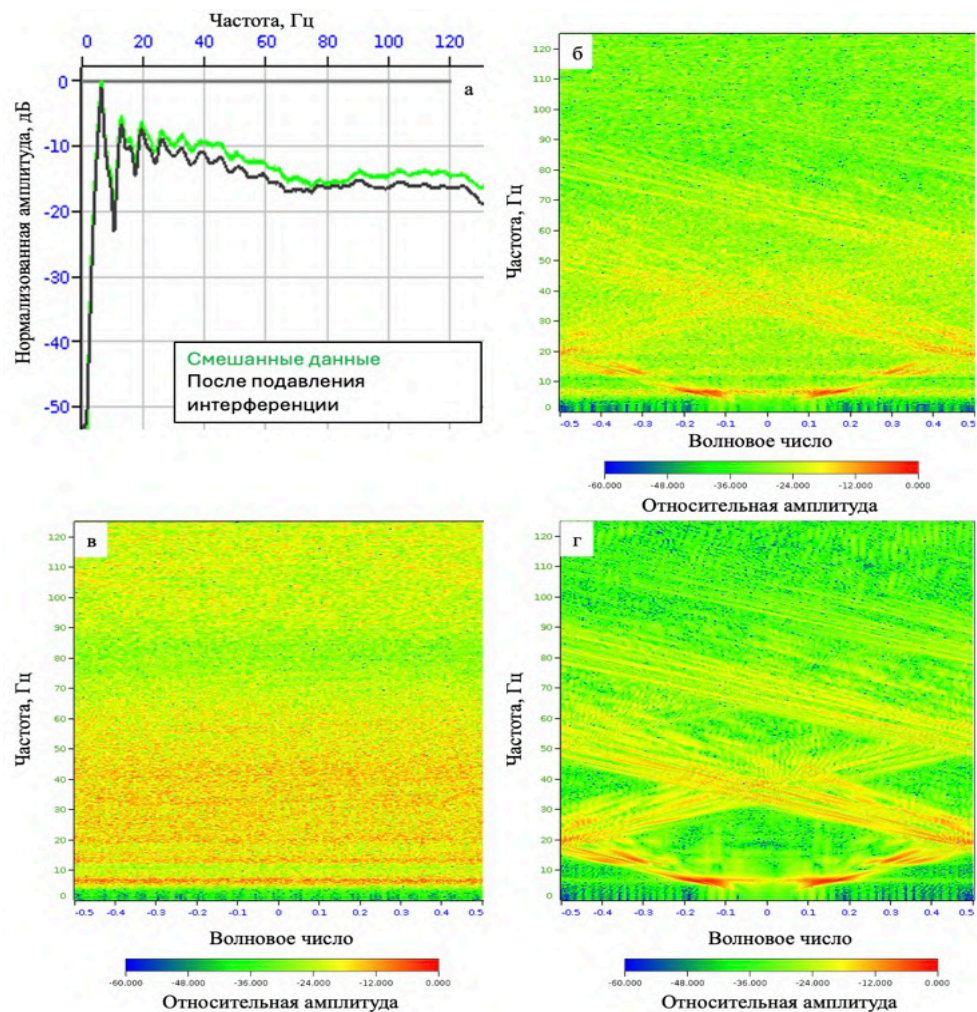


Рисунок 4.10 Спектральный анализ результатов разделения данных линии 2566. а – спектр до и после подавления интерференции. б,г - 2D F-K спектр до и после подавления шума, соответственно. в – разностный спектр между б и г

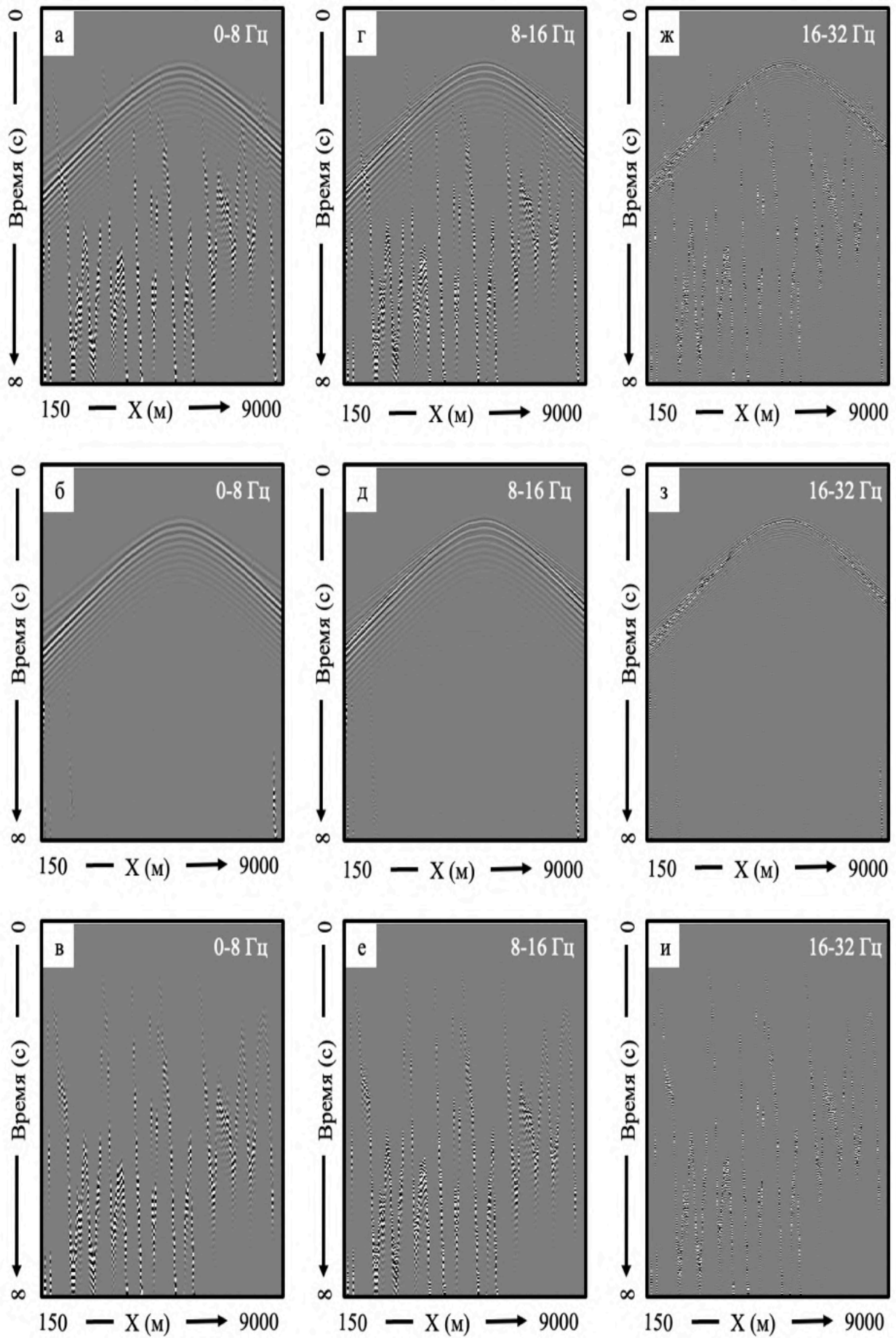


Рисунок 4.11. Результаты подавления интерференции линии 2566 для различных частот

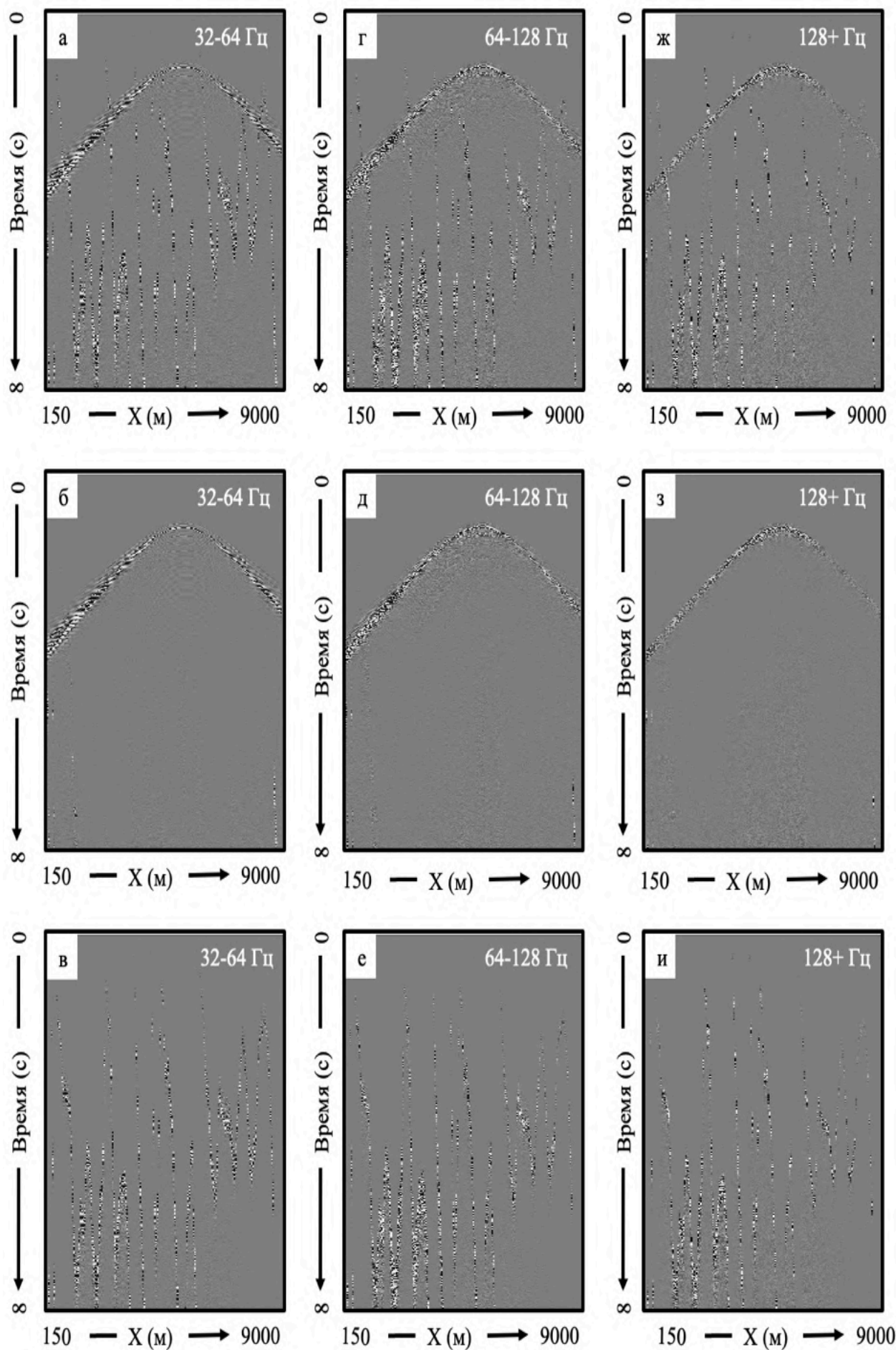


Рисунок 4.12. Результаты подавления интерференции линии 2566 для различных частот

После подтверждения эффективности алгоритма на одиночных сейсмограммах подавление интерференции было выполнено для 47 донных станций одной приёмной линии, чтобы оценить результат на временных разрезах. На рисунках 4.13–4.14 приведены характерные сечения полученного псевдо-куба. Их анализ подтверждает устойчивое снижение шумовой составляющей при сохранении полезных отражений. Вместе с тем в ряде зон заметны локальные артефакты: утечки по краям окон и остатки выстрелов «софт-старт». На рисунке 4.15 показана псевдо-2D сумма по выбранной приемной линии, позволяющая оценить интегральный эффект подавления интерференции на временном разрезе. До подавления уверенно доминирует шум: низкая часть разреза заполнена мелкозернистой текстурой, а в верхней части фиксируются гребни шума, нарушающие непрерывность отражений. После подавления наблюдается отчетливое повышение когерентности и контрастности: исчезает шум, горизонты становятся более ровными и связными, проявляются наклонные события, ранее скрытые помехой. Увеличение в красных окнах демонстрирует выравнивание фаз и исчезновение полосчатости. Разностное изображение содержит преимущественно некогерентную энергию с характерной для смешанных источников зернистой структурой. Выраженных потерь полезного сигнала не наблюдается. Остатки неподавленного шума объясняются уже описанными выше технологическими причинами. В целом псевдо-2D сумма тоже подтверждает результативность процедуры подавления интерференции: отношение сигнал/шум возрастает, интерпретируемость разреза улучшилась, а остаточные артефакты носят локальный характер.

Следует отдельно оценить вычислительную трудоёмкость процедуры разделения перекрывающихся источников. На стандартной рабочей станции (Core i7, 64 ГБ ОЗУ) при использовании одного ядра время подавления интерференции для одной Н-компоненты сейсмограммы ОПП из реального набора составило порядка 1 часа; для более крупного синтетического примера из главы 3 — около 3 часов. Экстраполяция на производственный объём с 160 линиями возбуждения (вместо 80) даёт ориентировочно ≈ 5 часов на одну компоненту. Для типового «патча» с 1600 донными станциями суммарная потребность на одном ядре составит $5 \times 1600 \times 4 = 32\,000$ часов CPU, то есть около 1330 суток ($\approx 3,65$ года) непрерывных вычислений. Это подчёркивает, что подавление интерференции — ресурсоёмкая операция и требует адаптации под многопроцессорные/многоузловые конфигурации современных систем обработки данных.

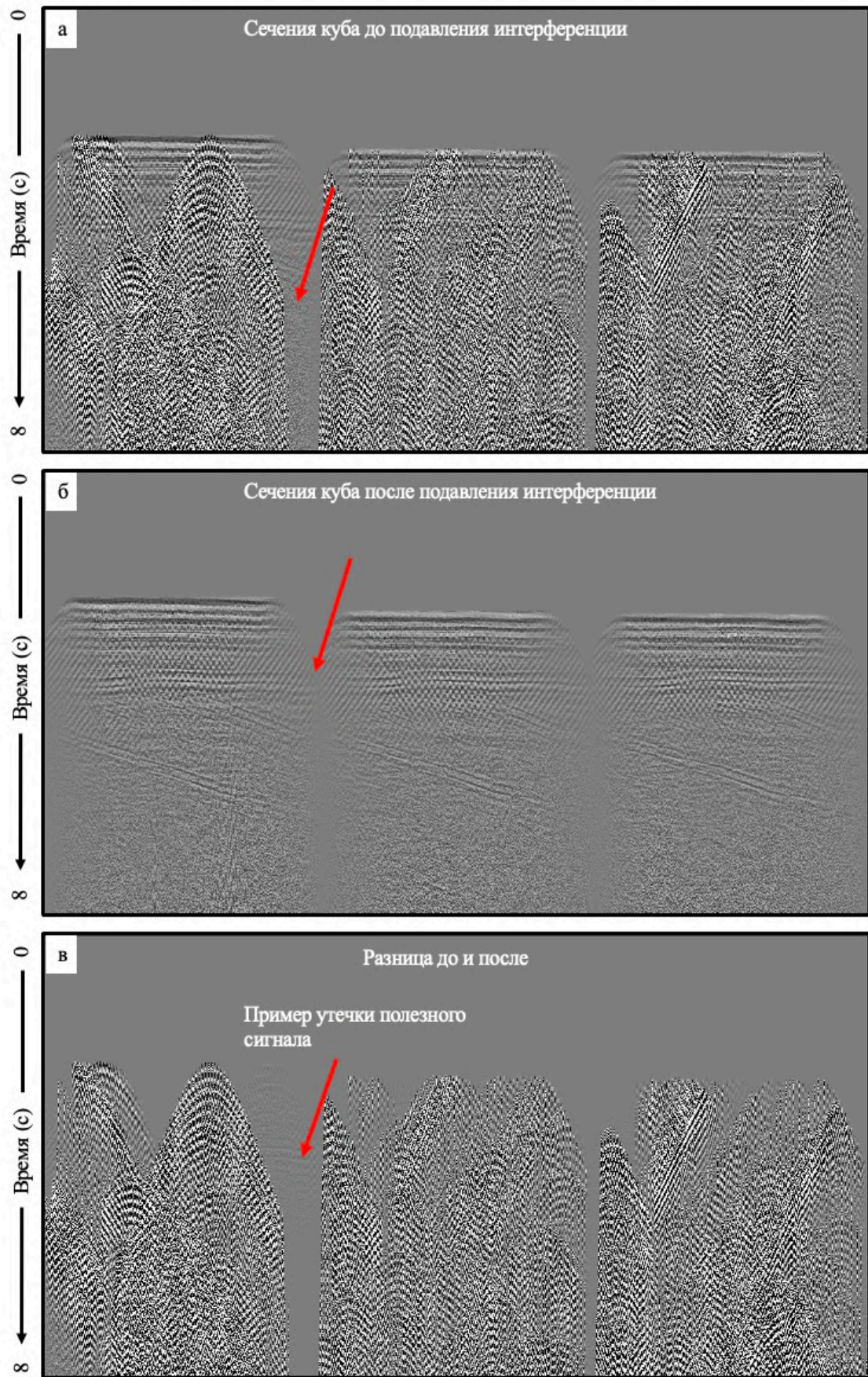


Рисунок 4.13. Временные разрезы сечения куба до (а) и после (б) подавления интерференции; разница (в).

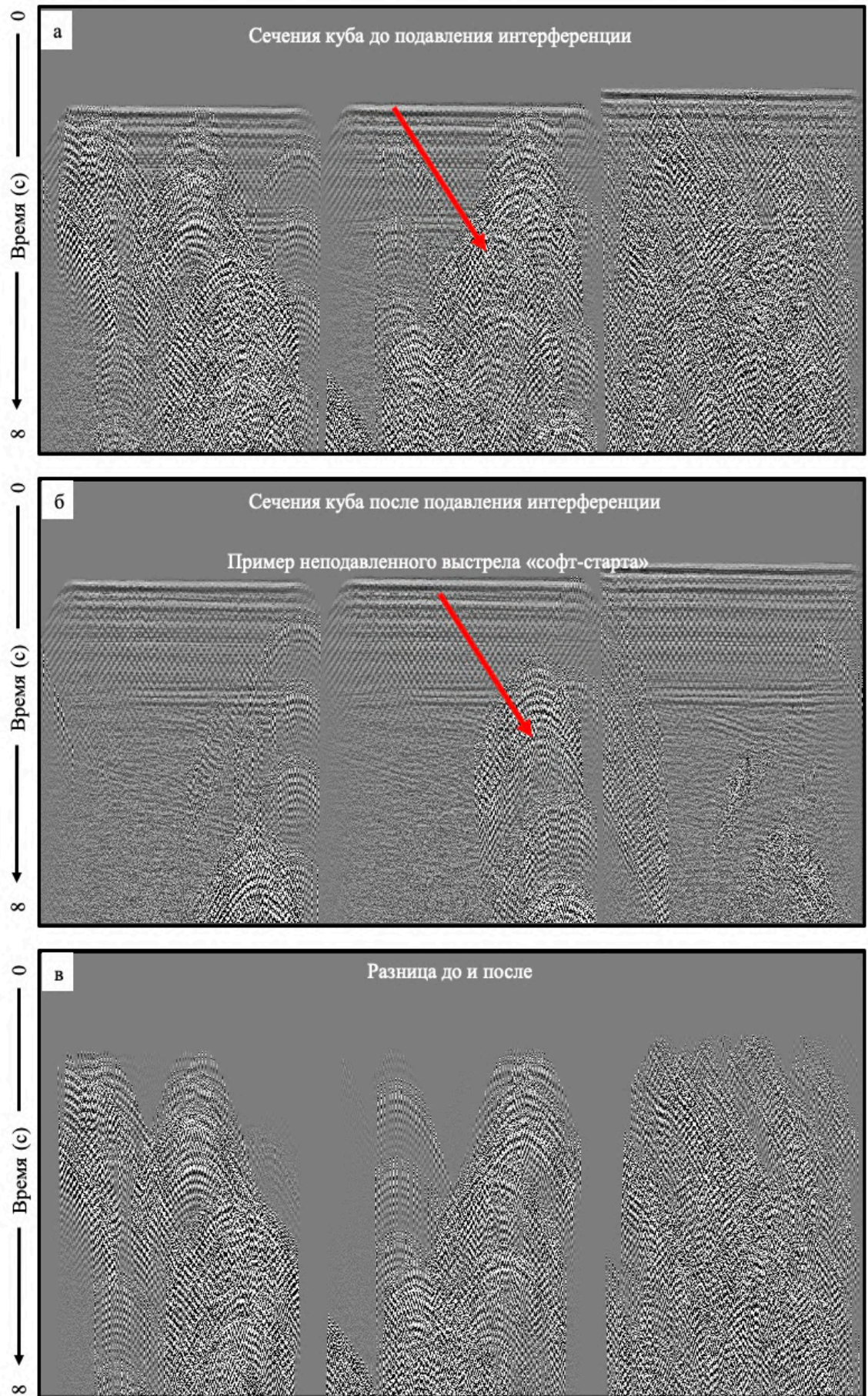


Рисунок 4.14. Временные разрезы сечения куба до (а) и после (б) подавления интерференции; разница (в).

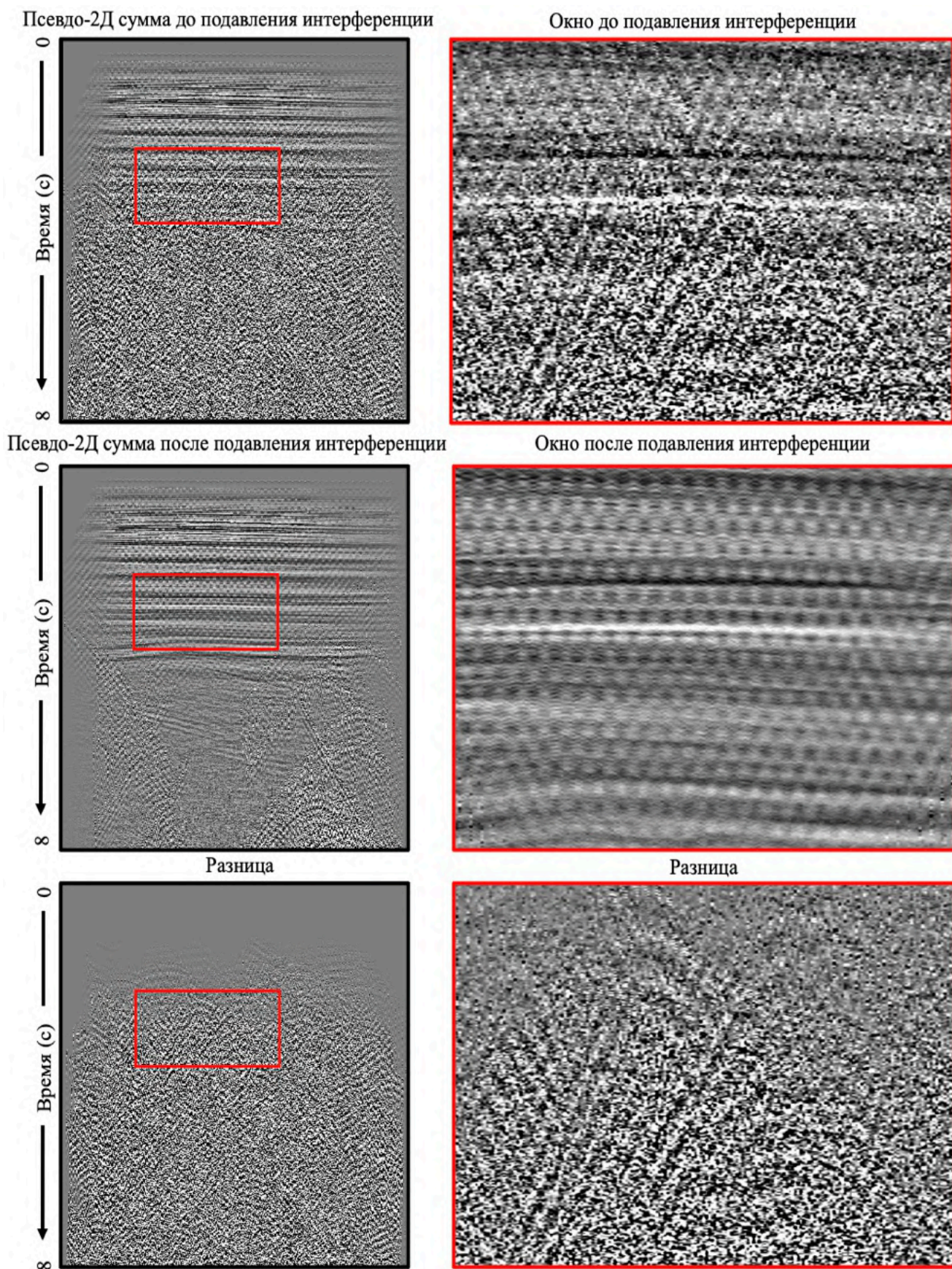


Рисунок 4.15. Псевдо-2D временной разрез до и после подавления интерференции. Разница. Красным выделено отдельное окно временного разреза.

4.3. Методические рекомендации по проведению полевых работ с перекрывающимися источниками на шельфе

Предложенный алгоритм подавления интерференции от перекрывающихся источников доказал свою эффективность при применении к синтетически смешанным и реальным данным опытно методических работ. Вместе с тем, полученные результаты разделения данных опытно-методических работ обладают рядом недостатков, основными из которых являются отсутствие подавления сигналов от выстрелов, сделанных во время «софт-старта» и локальные утечки полезного сигнала на границах окон F-K преобразования при захвате нулевых трасс. Дополнительно отметим, что в работах не применялось аппаратное, случайное смещение времен возбуждений. В иной акватории и при других гидрометеоусловиях это могло бы привести к катастрофическим результатам и неспособности разделить сигналы. Несмотря на это, недостатки объяснимы и вызваны сугубо технологическими и методологическими причинами – это еще раз подчеркивает, что полевые работы с перекрывающимися источниками на шельфе требуют тщательного планирования и дисциплины на всех этапах. С учетом изложенного предлагается сформулировать методические рекомендации по организации и проведению съемок с перекрывающимися источниками на шельфе:

1. Все координаты источников и приёмников, а также времена возбуждения сигналов должны быть полностью задокументированы, включая случайные возбуждения и возбуждения во время процедуры «софт-старт»;
2. Запись сигнала должна вестись непрерывно;
3. Сеть возбуждения должна быть регулярной;
4. Для создания некогерентной интерференции при возбуждении сигналов необходимо вводить случайную аппаратную задержку величиной в интервале от ± 0.25 до ± 1 секунды;
5. Времена возбуждения сигналов должны быть проанализированы соответствующими процедурами контроля качества.

Заключение

Методика проведения полевых работ с перекрывающимися источниками открывает реальные возможности для повышения качества и / или производительности полевых работ на суше и шельфе. Это особенно критично для Арктического шельфа с короткими полевыми сезонами (60–90 дней) и дефицитом специализированного флота, где увеличение плотности наблюдений и сокращение календарных сроков без снижения информативности данных становится ключевым фактором эффективности. В таких условиях технология перекрывающихся возбуждений оказывается наиболее реалистичным путем наращивания объемов полевых работ при контролируемых затратах.

Чтобы обеспечить успешное подавление помех от перекрывающихся источников при выполнении полевых работ требуется соблюдать ряд обязательных требований: ввод программируемых задержек времен выстрелов для создания некогерентного характера интерференции; регулярная геометрия пунктов возбуждения; непрерывная регистрация; ведение полного и точного журнала времени и координат всех возбуждений, включая «софт-старт»; а также наличие надёжного алгоритма подавления интерференции и регламентов контроля качества.

Для разделения сигналов при перекрывающемся возбуждении их несколькими источниками разработан алгоритм на основе разрежённой инверсии с применением метода итеративного жёсткого порога (ИТ) в локальном 3D F–K-представлении. Работоспособность разработанного алгоритма подтверждена на синтетически смешанных и реальных данных опытно-методических работ: зафиксировано устойчивое подавление интерференции при сохранении фазово-амплитудной структуры полезных отражений. Средний прирост соотношения сигнал/шум на синтетически смешанных данных составил около 30 дБ.

Подготовлены практические рекомендации по организации полевых работ и процедурам контроля качества, обеспечивающим воспроизводимость результата на производственных объёмах.

Рекомендации и перспективы

Для совершенствования технологии проведения работ необходима автоматизация ведения журналов времен возбуждения сигналов, подготовка программного обеспечения для генерации таблиц случайных задержек возбуждений сигнала, создание графа полевого контроля качества;

Улучшение работы алгоритма связано с его адаптацией к высокопроизводительным вычислительным средам, анализом перспектив использования альтернативных решателей, использованием различных размеров локальных 3-D окон F-K - малые окна для ранних событий

высокой кривизны и более крупные для глубинных отражений, применением многостадийной инверсии с использованием априорной кинематики;

Для окончательной промышленной валидации целесообразна пилотная съёмка с параллельным применением классической и перекрывающейся методики, полной обработкой до глубинной миграции/AVO и оценкой влияния на 4D-параметры.

В целом проделанная работа демонстрирует, что при соблюдении требований к полевым работам и использовании предложенного подхода к разделению сигналов съёмка с перекрывающимися источниками обеспечивает существенный прирост производительности без ущерба для качества данных. Представленная методика и рекомендации формируют основу для её масштабного и безопасного внедрения в практику морской сейсморазведки.

Список литературы

1. Граничин О. Н. Рандомизация измерений и l-1 оптимизация //Стохастическая оптимизация в информатике. – 2009. – Т. 5. – С. 3-23.
2. Жуков А.П., Скирта Д.А., Шехтман Г.А. Пути повышения производительности вибросейсморазведки //Приборы и системы разведочной геофизики. – 2022– №. 2. – С. 57-70.
3. Коротков И.П., Жуков А.П. Независимое одновременное возбуждение свип сигналов для повышения производительности вибросейсморазведки // Труды III Международной геолого-геофизической конференции и выставки «ГеоЕвразия 2020. Современные технологии изучения и освоения недр Евразии». – 2020. – Том II. – С. 93-96.
4. Ошкин А. Н., Коньков А.И., Тарасов А.В., Шувалов А.А., Игнатьев В.И. Методы минимизации и подавления корреляционных шумов одновременно работающих источников в вибросейсморазведке //Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. – 2019. – №. 1. – С. 98-106.
5. **Казанин Г.А.**, Гайнанов В.Г., Литвачук А.В., Ткач В.С. Разделение сигналов от перекрывающихся источников на примере синтетически смешанных данных морской сейсморазведки с донными станциями // Приборы и системы разведочной геофизики № 4 (83). 2024 С. 52–58. EDN: DDREGM (0,81 п.л., вклад автора 70 %). Импакт-фактор 0,056 (РИНЦ)
6. **Казанин Г.А.**, Гайнанов В.Г., Базилевич С.О. Влияние случайной задержки между возбуждением сигналов при перекрывающимся отстреле на характер наблюдаемого шума // Приборы и системы разведочной геофизики № 4 (83). 2024 С. 72–81. EDN: AZUMPU (1,16 п.л., вклад автора 60 %) Импакт-фактор 0,056 (РИНЦ)
7. **Казанин Г.А.**, Гайнанов В.Г. Технологии разделения сигналов при перекрывающемся отстреле площади морских сейсмических исследований // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. Т. 64. № 4. 2025. С. 103–106. EDN: LYFKRL (0,43 п.л., вклад автора 60 %). Импакт-фактор 0,288 (РИНЦ)
8. Литвачук А.В., **Казанин Г.А.**, Казанина М.А., Шепелев А.А., Сафонов Д.А. Разработка и практическая реализация алгоритма деблендинга с использованием SDK Альтаир-М // Приборы и системы разведочной геофизики № 2 (85). 2025 С. 66–71. EDN: KVMYTI (0,69 п.л., вклад автора 55 %). Импакт-фактор 0,056 (РИНЦ)
9. Aaron P., Byerley G., Monk D. Assessing marine 3D seismic acquisition with new technology: A case history from Suriname //SEG International Exposition and Annual Meeting. – SEG, 2016. – С. SEG-2016-13959846.
10. Abma, R., Q. Zhang, A. Arogunmati, and G. Beaudoin, 2012, An overview of BP's marine Independent Simultaneous Source field trials: 74th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 1–5.

11. Abma R. L. Method for separating independent simultaneous sources : пат. 8559270 CIIA. – 2013
12. Abma R. Shot scheduling in simultaneous shooting //SEG International Exposition and Annual Meeting. – SEG, 2014. – C. SEG-2014-0812
13. Abma R., Foster M. S. Simultaneous source seismic acquisition. – Society of Exploration Geophysicists, 2020.
14. Abma R. L., Yan J. Separating simultaneous sources by inversion //71st EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2009. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2009. – C. cp-127-00396.
15. Abma R., Howe D., Foster M., Ahmed I., Tanis M., Zhang Q., Arogunmati A., Alexander G. Independent simultaneous source acquisition and processing //Geophysics. – 2015. – T. 80. – №. 6. – C. WD37-WD44.
16. Allen K.P., Johnson M.L., May J.S. High fidelity vibratory seismic (HFVS) method for acquiring seismic data. // SEG Technical Program Expanded Abstracts 1998, p. 140-143.
17. Andersen K.D. Method for cascading sweeps for a seismic vibrator. // US Patent №5,410,517 (Apr. 25, 1995).
18. Baardman, R.H., Hegge, R.F., 2020. Machine learning approaches for use in deblending. Lead. Edge 39 (3), 188e194.
19. Bagaini C., Daly M., Moore I. The acquisition and processing of dithered slip-sweep vibroseis data //Geophysical Prospecting. – 2012. – T. 60. – №. 4-Simultaneous Source Methods for Seismic Data. – C. 618-639.
20. Berkhout A. J. Seismic Migration: Imaging of Acoustic Energy by Wave Field Extrapolation...: Imaging of Acoustic Energy by Wave Field Extrapolation. – Elsevier, 1982.
21. Beck A., Teboulle M. A fast iterative shrinkage-thresholding algorithm for linear inverse problems //SIAM journal on imaging sciences. – 2009. – T. 2. – №. 1. – C. 183-202.
22. Beasley C. J., Chambers R. E., Jiang Z. A new look at simultaneous sources //Seg technical program expanded abstracts 1998. – Society of Exploration Geophysicists, 1998. – C. 133-135.
23. Blumensath T., Davies M. E. Iterative hard thresholding for compressed sensing //Applied and computational harmonic analysis. – 2009. – T. 27. – №. 3. – C. 265-274.
24. Berkhout A. J. G. Changing the mindset in seismic data acquisition //The Leading Edge. – 2008. – T. 27. – №. 7. – C. 924-938.
25. Berkhout G., Blacquiere G. Effect of noise in blending and deblending. // SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2013, 94-98.
26. Birnie, C., Alkhalifah, T., 2022. Transfer learning for self-supervised, blind-spot seismic denoising. Front. Earth Sci. 10, 1053279.

27. Boyd, S., Parikh, N., Chu, E., Peleato, B., & Eckstein, J. Distributed optimization and statistical learning via the alternating direction method of multipliers //Foundations and Trends® in Machine learning. – 2011. – T. 3. – №. 1. – C. 1-122.
28. Brager D., Sonika S., Apeland G., Kumar R., Bilsby P., Zadeh H.M., Henneber K., Ivanov Y.. Joint seismic interference and simultaneous source separation in an OBN survey using multi-stage iterative source separation //84th EAGE Annual Conference & Exhibition. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2023. – T. 2023. – №. 1. – C. 1-5.
29. Bouska J. Distance separated simultaneous sweeping, for fast, clean, vibroseis acquisition. // Geophysical Prospecting, vol. 58, pp.123-153, 2010.
30. Chen, Y., Yuan, J., Jin, Z., Chen, K., & Zhang, L. Deblending using normal moveout and median filtering in common-midpoint gathers //Journal of Geophysics and Engineering. – 2014. – T. 11. – №. 4. – C. 045012
31. Chen Y., Fomel S., Hu J. Iterative deblending of simultaneous-source seismic data using seislet-domain shaping regularization //Geophysics. – 2014. – T. 79. – №. 5. – C. V179-V189.
32. Chen Y. Deblending using a space-varying median filter //Exploration Geophysics. – 2015. – T. 46. – №. 4. – C. 332-341.
33. Chen, Y., Zhang, D., Jin, Z., Chen, X., Zu, S., Huang, W., & Gan, S. Simultaneous denoising and reconstruction of 5-D seismic data via damped rank-reduction method //Geophysical Journal International. – 2016. – T. 206. – №. 3. – C. 1695-1717.
34. Chen, H., Cao, S., Zu, S., Yang, B., Shen, S., & Sun, X. Iterative deblending using the POCS algorithm in the approximate flattened domain //Journal of Geophysics and Engineering. – 2018. – T. 15. – №. 4. – C. 1104.
35. Chen, Y., Zu, S., Wang, Y., & Chen, X. Deblending of simultaneous source data using a structure-oriented space-varying median filter //Geophysical Journal International. – 2020. – T. 222. – №. 3. – C. 1805-1823.
36. Chen X., Wang B. Self-supervised multistep seismic data deblending //Surveys in Geophysics. – 2024. – T. 45. – №. 2. – C. 383-407.
37. Dean T., Iranpour K., Clark M., Poole A. Dithered sweep length - a new technique for attenuating harmonic noise in vibroseis data. // 78th EAGE Conference & Exhibition 2016, Vienna, Austria, 30 May - 2 June 2016.
38. Deluchi I., Marchall R. and Werner H. 3-D seismic survey of the Gaggiano Oil Field with quaternary encoding dual-source Vibroseis technique//Expanded Abstracts, Technical Program SEG, 1987, 58.2, 570-573.

39. Gan, S., Wang, S., Chen, Y., Chen, X., & Xiang, K. Separation of simultaneous sources using a structural-oriented median filter in the flattened dimension //Computers & Geosciences. – 2016. – T. 86. – C. 46-54.
40. Gan, S., Wang, S., Chen, Y., Chen, X., Huang, W., & Chen, H. (2016). Compressive sensing for seismic data reconstruction via fast projection onto convex sets based on seislet transform. Journal of Applied Geophysics, 130, 194-208.
41. Gong, X., Feng, F., Jiao, X., & Wang, S. Deblending using an improved apex-shifted hyperbolic radon transform based on the Stolt migration operator //Journal of Geophysics and Engineering. – 2017. – T. 14. – №. 5. – C. 1115-1123.
42. Hager Ed., Kneale. R, Hansen L., Thompson T. Baxter: A high-resolution penta-source marine 3D seismic acquisition //SEG International Exposition and Annual Meeting. – SEG, 2016. – C. SEG-2016-13879512.
43. Hampson G., Stefani J., Herkenhof F. Acquisition using simultaneous sources. //SEG Technical Program Expanded Abstracts 2008, 2816-2820.
44. Howe D., Foster M., Allen T., Taylor B, Jack I. Independent Simultaneous Sweeping - a method to increase the productivity of land seismic crews. / / SEG Technical Program Expanded Abstracts: 2826-2830, 2008.
45. Jeong W., Tsingas C., Almubarak M. S. Deblending and merging of 3D multi-sweep seismic blended data //Geophysical Prospecting. – 2022. – T. 70. – №. 2. – C. 246-261.
46. Ji, Y., Willacy, C., Tang, Z., Tegtmeier-Last, S. Deblending of simultaneous source data using a non-uniform, hybrid-Radon transform //81st EAGE Conference and Exhibition 2019. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2019. – T. 2019. – №. 1. – C. 1-5.
47. Jiang Z., Abma R. An analysis on the simultaneous imaging of simultaneous source data //SEG International Exposition and Annual Meeting. – SEG, 2010. – C. SEG-2010-3115.
48. Ibrahim A., Trad D. Deblending using robust inversion of Stolt-based Radon operators. – 2019
49. Ibrahim A., Sacchi M. D. Simultaneous source separation using a robust Radon transform //Geophysics. – 2014. – T. 79. – №. 1. – C. V1-V11.
50. Kamil Y. I. Kumar R., Mahdad A., Narayan A., Brouwer W.G., Misbah A., Vassallo M. Robust multistage separation of simultaneous sources using priors //82nd EAGE Annual Conference & Exhibition. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2021. – T. 2021. – №. 1. – C. 1-5.
51. Kumar A., Hampson G., Vice N., Thompson T. Inversion-based deblending using iterative thresholding //EAGE 2020 Annual Conference & Exhibition Online. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2020. – T. 2020. – №. 1. – C. 1-5.

52. Kumar R., Kamil Y. I., Mahdad A., Narayan A., Brouwer W.G., Misbah A., Vassallo M. Inherent Challenges of Randomized Shooting Strategies on Deblending and a Robust Multistage Prior Based Solution //82nd EAGE Annual Conference & Exhibition. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2021. – T. 2021. – №. 1. – C. 1-5.
53. Langhammer, J., Bondeson, H., Kjølhamar, B., Baldock, S., Masoomzadeh, H., & Ratnett, N. (2018, June). Triple source in seismic exploration—Experiences offshore Norway. In 80th EAGE Conference and Exhibition 2018 (Vol. 2018, No. 1, pp. 1-5). European Association of Geoscientists & Engineers.
54. Lin R. Projected gradient descent methods for simultaneous-source seismic data processing. – 2022.
55. Liu Yi, Qi Yongfei, Tao Longshu, E Dianliang, Hou Chengfu. Application and effect analysis of Dynamic Slip Sweep in a high channel and high productivity seismic acquisition project. // CPS/SEG Beijing 2014 International Geophysical Conference, p. 163-166.
56. Luiken N., Ravasi M. SSDeblend3D: Leveraging Self-Supervised, Blind-Spot Deep Denoisers for 3D Seismic Deblending //85th EAGE Annual Conference & Exhibition. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2024. – T. 2024. – №. 1. – C. 1-5.
57. Mahdad A., Doulgeris P., Blacquiére G. Separation of blended data by iterative estimation and subtraction of blending interference noise //Geophysics. – 2011. – T. 76. – №. 3. – C. Q9-Q17.
58. Mahdad A. Deblending of seismic data. – 2012.
59. Mahmoudian, F., Curtis, J., De Meersman, K., Kennedy, R., & Staples, G. Deblending of simultaneous source data. – 2023
60. Monk, D., 2013, An oil independent view on advances in petroleum industry seismic acquisition technology: Proceedings of the 2013 South East Asia Petroleum Exploration Society (SEAPEX) Conference, AAPG, 1–61.
61. Parikh N., Boyd S. Proximal algorithms //Foundations and trends in Optimization. – 2014. – T. 1. – №. 3. – C. 127-239.
62. Qu S., Zhou H., Liu R., Chen Y., Zu S., Yu S., Yuan J, Yang Y. Deblending of simultaneous-source seismic data using fast iterative shrinkage-thresholding algorithm with firm-thresholding //Acta Geophysica. – 2016. – T. 64. – C. 1064-1092.
63. Ravasi M. Seismic deblending with a hard data constraint. – 2024
64. Reinicke Urruticoechea C. Seismic blending and deblending of crossline sources. – 2015.
65. Rozemond H. J. Slip-sweep acquisition //SEG Technical Program Expanded Abstracts 1996. – Society of Exploration Geophysicists, 1996. – C. 64-67.
66. Song J., Li P., Wang W., Qian Z., Sun P., Xue H. Simultaneous vibroseis data separation through sparse inversion //The Leading Edge. – 2019. – T. 38. – №. 8. – C. 625-629.
67. Sun J., Slang S., Elboth T., Larsen Greiner T., McDonald S., Gelius L.-J., 2020.

68. A convolutional neural network approach to deblending seismic data. *Geophysics* 85 (4), WA13-WA26
69. Van Den Berg E., Friedlander M. P. Probing the Pareto frontier for basis pursuit solutions // *Siam journal on scientific computing*. – 2009. – T. 31. – №. 2. – C. 890-912.
70. Van Groenestijn G. J. A. Estimation of primaries and multiples by sparse inversion. – 2010.
71. Velasques M. M. Seismic Deblending: Using Iterative and Compressive Sensing Methods to Quantify Blending Noise Impact on 4D Projects. – Colorado School of Mines, 2020.
72. Widmaier, M., Roalkvam, C., Oukili, J., & Tønnessen, R. (2021). Maximizing quality and efficiency with wide-tow multi-source configurations. *First Break*, 39(11), 75-80.
73. Xia J., Geier N.A., Miller R.D., Tapie C.R. Orthogonal vibroseis sweeps. // *Geophysical Prospecting*, 2005, 53, p. 677-688.
74. Zhang S. H., Song J. W. Deblending by sparse inversion and its applications to high-productivity seismic acquisition: Case studies // *Petroleum Science*. – 2025.
75. Zhukov A., Korotkov I., Sidenko E., Nekrasov I., Gridin P., Galikeev T. Simultaneous pseudo-random shuffle sweep generation and increased seismic data acquisition productivity. // *SEG Annual Meeting*. Houston. -2017.
76. Zu S., Cao J., Qu S., Chen Y., 2020. Iterative deblending for simultaneous source data using the deep neural network. *Geophysics* 85 (2), V131eV141.

Список иллюстраций

Рисунок 1.1. Сравнение морских сейсмических съёмок с различной плотностью трасс (Abma, Foster, 2020).....	11
Рисунок 1.2. Схематическое сравнение стоимости и качества работ выполняемых по классической методике сейсморазведочных работ и по методике с одновременным возбуждением сигнала (Mahdad, 2012)	12
Рисунок 1.3. Сейсмограммы ОПВ (а) и ОПП (в) полученные по результатам съемки методикой ISS, (б) и (г) эти же сейсмограммы после шумоподавления FX-деконволюцией (Howe et al., 2008).....	17
Рисунок 1.4. Временной разрез полученный по классической методике (а) с расстоянием между линиями ПВ 360 м. Временной разрез, полученный по методике ISS (б) с расстоянием между линиями ПВ 90 м (Howe et al., 2008)	18
Рисунок 1.5. а – наземная сейсморазведка методикой ISS с вибраторами, б – сейсмограмма ОПП с интерференцией от других источников, в – сейсмограмма ОПП после разделения перекрывающихся сигналов с помощью инверсии, г – разница между б и в (Song et al., 2019) .	22
Рисунок 1.6. Результаты разделения данных с помощью инверсии. а – сейсмограмма ОПВ, на которой зафиксирован сигнал от 7 источников, б – сейсмограмма ОПВ после разделения, в – разница, г – временной разрез до разделения, д – после разделения, е - разница (Song et al., 2019).....	23
Рисунок 1.7. Результат разделения морских сейсмических данных донными косами с применением алгоритма машинного обучения. а – исходная сейсмограмма ОПП. б – синтетически смешанная сейсмограмма, смешано 4 источника. в – результат разделения с применением алгоритма машинного обучения. г – результат разделения при помощи инверсии. Результат алгоритма машинного обучения показывает снижение качества в нижней части разреза, однако отсевают артефакт рядом с первыми вступлениями (Luiken, Ravasi; 2024)	24
Рисунок 1.8. Процесс выполнения сейсмической съемки 2D – а. Процесс выполнения сейсмической съемки 3D – б.	29
Рисунок 1.9. Проведение сейсмической съемки 3D с донными станциями. а, б – процесс раскладки донных станций с судна-раскладчика. в, г – пингеровка (уточнение позиции) донных станций на дне с помощью гидроакустической антенны. д,е – процесс отстрела приемных линий судном-источником (Источник – архив АО «МАГЭ»).....	30
Рисунок 1.10. Влияние количества судов-источников на стоимость сейсмической съемки с донными станциями (Abma, Foster, 2020).....	34
Рисунок 1.11. Сравнение классической методики съемки и методики ISS на море. а – временной разрез, полученный по классической методике, б – временной разрез, полученный с помощью	

ISS, в – временной слайс амплитуд по классической методике, г – по методике ISS. д – временной разрез полученный по результатам 3D работ с косами, е – временной разрез ISS....	36
Рисунок 1.12. Разделение сигналов от перекрывающихся источников с применением инверсии. Сверху конфигурация судов-источников. а,б – соответствующие сейсмограммы ОПП. в,г – сейсмограммы после подавления интерференции с помощью инверсии.	39
Рисунок 2.1. Иллюстрация матрицы данных P . а - сигнал, сгенерированный в точке возбуждения x_s , измеряемый в точке приема x_r , как функция времени t ; б - куб справа равен кубу слева после преобразования Фурье, где каждый срез по частоте является матрицей данных P (Van Groenestijn, 2010).....	40
Рисунок 2.2. Иллюстрация матрицы данных P (Mahdad, 2012).....	41
Рисунок 2.3. Обычная матрица источников S преобразуется в матрицу смешанных источников $S_{\text{смеш}}$ путем применения матрицы смешивания Γ . Каждая звезда обозначает собой один выстрел, а оттенок серого у звезд отражает относительное время возбуждения (Reinicke, 2015).	42
Рисунок 2.4. Схематическая иллюстрация оператора смешивания данных Γ , сопряженного оператора Γ^H . Здесь m – данные без смешивания, d – смешанные данные (Mahmoudian, 2023).....	46
Рисунок 2.5. Иллюстрация применения оператора смешивания и “расчесывания” (Lin, 2022) ..	46
Рисунок 2.6. Иллюстрация некоторых разреженных преобразований. а – синтетическая сейсмограмма с несколькими событиями, б – эта же сейсмограмма после F-K преобразования, в – линейное преобразование Радона.....	51
Рисунок 2.7. а - Сейсмограмма ОПП, используемая для оценки разреженности. б,в – оранжевое и зеленое локальное окно размером 20 трасс и 0,1 с. используемое для оценки разреженности.	52
Рисунок 2.9. Зависимость качества деблендинга от размера случайных задержек выстрелов и частоты, цветом выделена степень подавления шума, красный – плохая сепарация сигнала от шума, синий – хорошая сепарация (Abma, 2014).	55
Рисунок 2.10. Низко и высокочастотный сигнал, второй сигнал сдвинут на 16 мс и корреляция между первоначальными и сдвинутыми сигналами (Abma, Foster, 2020).	56
Рисунок 2.11. Случайные смещения времен сдвига на основе равномерного распределения $\mu = \pm 1$ (а), гистограмма интервалов времен между последовательными выстрелами для сдвигов (б), стандартное отклонение $\sigma = 0.87$ с.....	58
Рисунок 2.12. Исходная сейсмограмма (а). Сейсмограммы, смешанные с различным смещением времени $\mu = \pm 0.25, 0.5, 0.75, 1.5$ – б, в, г, д, е соответственно.	59
Рисунок 3.1. Первоначальная сетка возбуждения (а), донная станция расположена в центре расстановки в координатах $x=4000, y=2000$. б, в, г – различные срезы данных, б – черный крест, в – оранжевый, г - зеленый.....	61

Рисунок 3.2. а – схема возбуждения сигнала перекрывающимися источниками, б – карта времен возбуждения сигнала, каждое судно отрабатывает по 40 линий.....	62
Рисунок 3.3. Результаты псевдо-деблендинга полученных смешанных данных для разных инлайнов и кросслайнов	63
Рисунок 3.4. Отдельное окно и его F-K спектр. а, в – до смешивания. б,г – после смешивания.	65
Рисунок 3.5. а – минимальные значения амплитуд в окнах F-K преобразования, б – порог на первой итерации алгоритма, в,г на 160-й и 220-й соответственно. Восстановления данных начинается с высокоамплитудных событий и постепенно снижается к наименьшим амплитудам в данных.	67
Рисунок 3.7. Результаты работы алгоритма разделения данных от перекрывающихся источников для разных инлайнов и кросслайнов	70
Рисунок 3.8. Разница между исходными (без шума) данными и данными после подавления шума. Разница умножена на 10.....	71
Рисунок 4.1. Карта возбуждения источников во время опытно-методических работ	76
Рисунок 4.2. Методика возбуждения сигнала на опытно-методических работах	76
Рисунок 4.3. Гистограммы и времена между последовательными возбуждениями для двух разных линий возбуждения: а,б – судно «Николай Трубятчинский», в, г – судно «Вячеслав Тихонов»	78
Рисунок 4.4. Карта времен возбуждения сигналов, дополненная нулевыми ПВ (бордовый цвет). Пересечениями обозначены сейсмограммы, используемые для визуализации. Красными квадратами показаны окна F-K преобразования (без учета перекрытия)	81
Рисунок 4.5. Пример сейсмограмм псевдо-деблендинга синего (а,б) и оранжевого пересечения (в,г), обозначенного на рисунке 4.4.....	82
Рисунок 4.6. Пример сейсмограмм псевдо-деблендинга зеленого пересечения	83
Рисунок 4.7. Результаты подавления интерференции (а, б) ЛПВ 2534 (синее пересечение); в,г – разностная сейсмограмма (амплитуды умножены на 10)	85
Рисунок 4.8. Результаты подавления интерференции (а, б) ЛПВ 2694 (оранжевое пересечение) в,г – разностная сейсмограмма (амплитуды умножены на 10).....	86
Рисунок 4.9. Результаты подавления интерференции (а, б) ЛПВ 2566 (зеленое пересечение); в,г – разностная сейсмограмма (амплитуды умножены на 10)	87
Рисунок 4.10 Спектральный анализ результатов разделения данных линии 2566. а – спектр до и после подавления интерференции. б,г - 2D F-K спектр до и после подавления шума, соответственно. в – разностный спектр между б и г	88
Рисунок 4.11. Результаты подавления интерференции линии 2566 для различных частот	89
Рисунок 4.12. Результаты подавления интерференции линии 2566 для различных частот	90

Рисунок 4.13. Временные разрезы сечения куба до (а) и после (б) подавления интерференции; разница (в).....	92
Рисунок 4.14. Временные разрезы сечения куба до (а) и после (б) подавления интерференции; разница (в).....	93

Список таблиц

Таблица 1. Алгоритм разделения сигналов от перекрывающихся источников на основе инверсии методом итеративного жесткого порога	49
Таблица 2. Сравнение стандартного отклонения σ интервалов времен между последовательными выстрелами для различного диапазона смещения времен выстрелов $\pm\mu$...	58
Таблица 3. Анализ времен возбуждения сигналов	77