

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Казанин Геннадий Алексеевич

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

1.6.9. Геофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2025

Диссертация подготовлена на кафедре сейсмометрии и геоакустики геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

**Научный
руководитель**

Гайнанов Валерий Гарифьянович
доктор технических наук, доцент

**Официальные
оппоненты:**

Тихоцкий Сергей Андреевич
*доктор физико-математических наук,
академик РАН, ФГБУН Институт физики
Земли им. О. Ю. Шмидта Российской
академии наук, директор*

Долгих Юрий Николаевич
*доктор геолого-минералогических наук, ООО
«Новатэк Научно-технический центр»,
аппарат при руководстве, ученый секретарь*

Хоштария Владислав Николаевич
*кандидат геолого-минералогических наук,
ООО «Газпром Недрa», управление
организации геологоразведочных работ и
сейсмических исследований на шельфе,
начальник управления*

Защита диссертации состоится 25 декабря 2025 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета МГУ.016.6 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, Главное здание МГУ, сектор «А», аудитория 415.

Е-mail: dsmsu0403@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский проспект, д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3711>

Автореферат разослан «__» ноября 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета МГУ.016.6,
кандидат технических наук

К.М. Кузнецов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Современные методики проведения сейсморазведочных работ на шельфе требуют применения новых подходов, которые позволяют 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 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, чтобы исключить интерференцию, в момент записи работает только один источник. Это жёстко 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, что обуславливает 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 таких съемок.

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), но эти технологии находятся в стадии разработки и пока не получили широкого практического распространения.

Зарубежный опыт и литература, несмотря на активное развитие этих подходов, пока не нашли отражения в отечественной практике морских сейсморазведочных работ. В России до настоящего времени 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 ограничиваются 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 остаются неосвоенными 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 были задействованы данные, полученные в ходе сейсмических работ 3D-4C. Для реализации алгоритма разделения наложенных сигналов применялся язык программирования Python и открытые библиотеки для обработки сейсмических данных, работы с линейными операторами и решением обратных задач `Numpy` и `PyProximal`. Визуализация и анализ полученных данных осуществлялись 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 разработки алгоритмов разделения данных от перекрывающихся источников.

В рамках работы предложены методические рекомендации, методики обработки и требования 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. 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 модельных 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.

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

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.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения, содержит 108 страниц текста, включая 47 рисунков и 3 таблицы, список литературы содержит 76 наименований.

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-4С; 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

Раздел 1.1 посвящен истории возникновения и мотивации к созданию методик проведения работ с перекрывающимся возбуждением сигнала. Сейсморазведка остаётся базовым инструментом поиска углеводородов, однако рост требований к качеству и плотности наблюдений делает традиционные съёмки дорогими и длительными. Приёмная часть уже не ограничивает наземные проекты (нодальные системы обеспечивают высокую плотность), тогда как ключевым сдерживающим фактором остаются источники, поскольку для исключения интерференции в традиционной съёмке требуется, чтобы в момент одной записи работал только один источник, что существенно ограничивает частоту возбуждений и снижает эффективность полевых работ. Для преодоления этих ограничений предложены методики с перекрывающимся возбуждением - одновременно или частично одновременно работающих источников (Beasley et al., 1998; Berkhout, 2008). Они позволяют либо сократить сроки (и, следовательно, бюджет), либо увеличить плотность возбуждения по источнику без увеличения длительности полевых работ, либо совместить оба эффекта. Производственный выигрыш удобно описывать индикаторами: ростом плотности пунктов возбуждения (SDR) и сокращением длительности работ (STR); их произведение характеризует общую производительность съёмки. Ключевое ограничение методик с перекрывающимися источниками - интерференция сигналов от разных источников на записи; для получения качественного изображения требуется этап специальной обработки для разделения сигналов от разных источников.

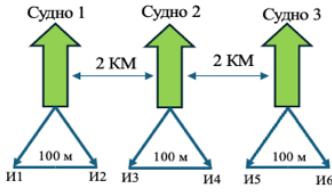
Раздел 1.2 посвящен современным подходам к проведению наземных сейсморазведочных работ на суше с применением технологии перекрывающихся источников. Согласно классификации, предложенной в работе (Bagaini et al., 2012), все методики можно условно разделить на две группы: независимое одновременное вибрирование (Independent Simultaneous Source, ISS) и управляемое одновременное вибрирование (Managed Simultaneous Source, MSS).

Выбор конкретной группы методов (ISS или MSS) зависит от множества факторов, среди которых особенности геологического строения исследуемой территории, требуемая степень детализации геологических задач, доступность и надёжность оборудования, а также

организационные и экономические ограничения полевых исследований. Например, методы MSS могут быть предпочтительны при необходимости обеспечения строгого оперативного контроля качества и высокого качества данных в условиях умеренного перекрытия сигналов, в то время как ISS эффективен при максимальной производительности в сложных полевых условиях с высокой степенью перекрытия сигналов. Тем не менее, по показателям общей производительности и устойчивости к сбоям оборудования методы ISS превосходят MSS и чаще рекомендуются для масштабных сейсмических исследований с высоким уровнем одновременной работы источников (Abma, Foster, 2020).

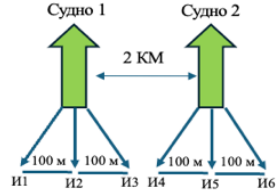
Рассмотрены методы подавление интерференции. Традиционные фильтрационные методы просты в реализации и эффективны при умеренном наложении сигналов, однако их применение ограничено в случаях сложного и интенсивного перекрытия. Методы на основе разреженной инверсии, например метод итеративного жесткого порога (Iterative Hard Thresholding, IHT), демонстрируют более высокую эффективность в условиях сильной интерференции и высокой зашумленности данных, но требуют наличия непрерывной записи для корректного восстановления несмешанных данных. В свою очередь, методы с применением машинного обучения активно развиваются и считаются перспективными, однако находятся на стадии разработки и требуют больших объемов обучающих данных.

В **разделе 1.3** описывается классический подход к выполнению полевых работ 3D-4C с использованием одиночного источника на шельфе и приведены ключевые отличия методик с перекрывающимися возбуждением источников на суше и море среди которых: необходимость введения случайных задержек во времена возбуждения для создания некогерентной картины интерференции, сложности с применением методики с перекрывающимися источниками в 2D и 3D съемках с сейсмическими косами, ограниченный экономический эффект при использовании более двух судов-источников. В разделе также приводятся примеры применения методики с перекрывающимися источниками на шельфе и результаты проведения обработки данных, основанных на разреженной инверсии (рисунок 1).



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

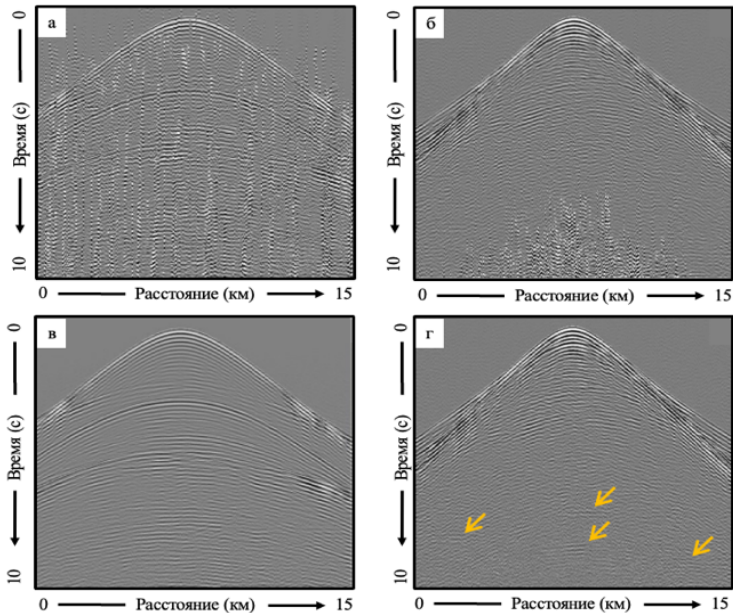


Рисунок 1. Разделение сигналов от перекрывающихся источников с применением инверсии. Сверху конфигурация судов-источников. а,б – соответствующие сейсмограммы ОПП. в,г – сейсмограммы после подавления интерференции с помощью инверсии (Kumar et al., 2021).

Глава 2. Алгоритм разделения сигналов на основе разреженной инверсии методом итеративного жесткого порога

В разделах 2.1 и 2.2 представлена математическая модель процесса смешивания сейсмических данных, полученных с перекрывающимися источниками. Данный процесс формулируется как прямая линейная задача, в которой наблюдаемая непрерывная запись от нескольких источников d является произведением матрицы смешивания Γ и искомым несмешанных данных m :

$$d = \Gamma m \quad (1)$$

Процесс устранения влияния матрицы Γ подразумевает подавление интерференции от наложившихся во времени источников и называется деблендингом.

В разделе 2.3 показано, что задача прямого восстановления исходных данных m без применения методов регуляризации является некорректной, поскольку количество строк в наблюдаемой матрице d меньше, чем число строк в матрице исходных данных m . Следовательно, для ее решения необходимы априорные знания или предположения о свойствах сигнала, в качестве которого используется предположение о том, что сигнал является разреженным в некоторой области.

Описан процесс псевдо-деблендинга, который позволяет построить так называемую “расчесанную” сейсмограмму ОПП из непрерывной записи сейсмического приемника путем временного сдвига и нарезки трасс с помощью сопряженной транспонированной матрицы Γ^H . Псевдо-деблендинг не является полноценным разделением сигналом, а служит лишь первым приближением, и, зачастую используется для целей визуализации и анализа интерференционного шума от перекрывающихся источников.

Продемонстрировано, что для решения некорректной задачи оптимизации в целях разделения сигналов, целесообразно использовать итеративный метод порогового сжатия (Iterative Hard Thresholding, ИТ), который опираются на итерационное решение задачи с разреженным приближением. В этом случае задача подавления интерференции формулируется как минимизация целевой функции:

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

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, применяемого как разрежающее представление - его оптимальность для задачи разделения перекрывающихся сигналов обоснована в **разделе 2.4**.

Точное итеративное решение уравнения (2) представлено ниже:

$$\tilde{m}_{i+1} = \sum_{j=1}^{n_w} M_j S_j^{-1} T_{\tau_i(\omega)} S_j W_j \{\tilde{m}_i + \alpha \Gamma^H (d - \Gamma \tilde{m}_i)\} \quad (3)$$

где, W_j и M_j операторы разбиения и склейки окон преобразования Фурье, n_w - количество окон Фурье. Такое локальное преобразование значительно повышает разреженность сигнала и обеспечивает эффективное представление наклонных событий в области преобразования. $\alpha = \frac{1}{\text{Максимальная кратность перекрытия}}$ – коэффициент

масштабирования, контролирующий величину вводимой на каждой итерации поправки, $T_{\tau_i(\omega)}$ - частотно-зависимый порог, вычисляемый на основании данных. На каждой итерации работы алгоритма происходит жесткое порогирование согласно уравнению (4), при котором сильнейшие коэффициенты (т.е. сигнал) в области преобразования Фурье сохраняются, а слабые (шум) обнуляются:

$$\tau_i(m) = \begin{cases} m, & |m| > \tau^i \\ 0, & |m| \leq \tau^i \end{cases} \quad (4)$$

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, а иллюстрация его применения представлена на рисунке 2.

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: $i = 0, \tilde{m}_0 = 0, R^{-1} = d, \tau_0(\omega) = \tau_{max}, tol = \min \tau_{min}(\omega)$
3:	До тех пор, пока $\min \tau_{min}(\omega) \geq tol \ \& \ i \leq n_{итер}$ 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 $\tilde{m}_i$

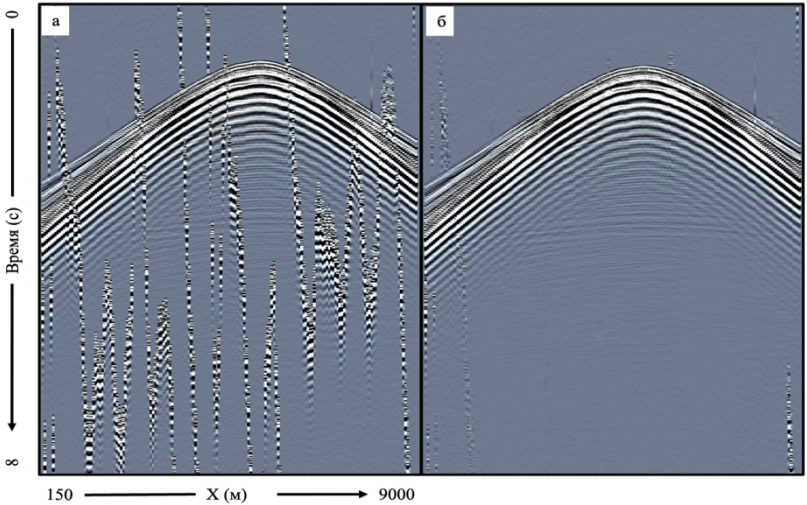


Рисунок 2. Иллюстрация применения алгоритма на реальной сейсмограмме ОПП. а – сейсмограмма ОПП до применения алгоритма, б – после применения алгоритма

В разделе 2.4 кратко изложена теория «сжимающегося ощущения» (compressive sensing) которая гласит, что сигналы могут быть сжаты (рисунок 3) в каком-либо разреженном (сжатом) пространстве и затем восстановлены в области t - x без потерь качества. На практике в обработке данных сейсморазведки уже достаточно давно и эффективно используют разреженные преобразования, примерами таких преобразований являются: F-K преобразование, преобразование Радона (линейное, параболическое, гиперболическое), куврлет преобразование и сейслет преобразование.

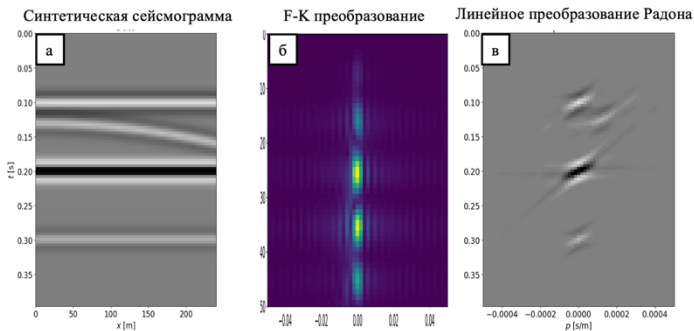


Рисунок 3. Иллюстрация разреженных преобразований. а – синтетическая сейсмограмма с несколькими событиями, б - F-K преобразования, в – линейное преобразование Радона

При выборе преобразования для использования в алгоритме был выполнен анализ степени сжатия сигнала (его разреженности) для различных разреженных преобразований глобально и локально к отдельным окнам (рисунок 4). После выполнения преобразований коэффициенты в каждом преобразованном домене сортируются по убыванию амплитуды, формируя убывающие одномерные векторы, а затем нормализуются (Gan et al., 2016). Затем 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 падает наиболее резко), тем выше степень разреженности преобразования. На основании этого анализа можно сделать вывод о том, что в локальных окнах F-K преобразование обладает достаточно высокой степенью разреженности, что и позволяет эффективно его применять в описанном выше алгоритме. Кроме этого, F-K преобразование обладает следующими преимуществами в сравнении с другими разреженными преобразованиями: высокая вычислительная эффективность и простота реализации, минимальная

параметризация, обратимость – прямое и обратное преобразование эквивалентны. Кроме того, F-K преобразование устойчиво к алиасингу в контексте задачи разделения сигналов. 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.

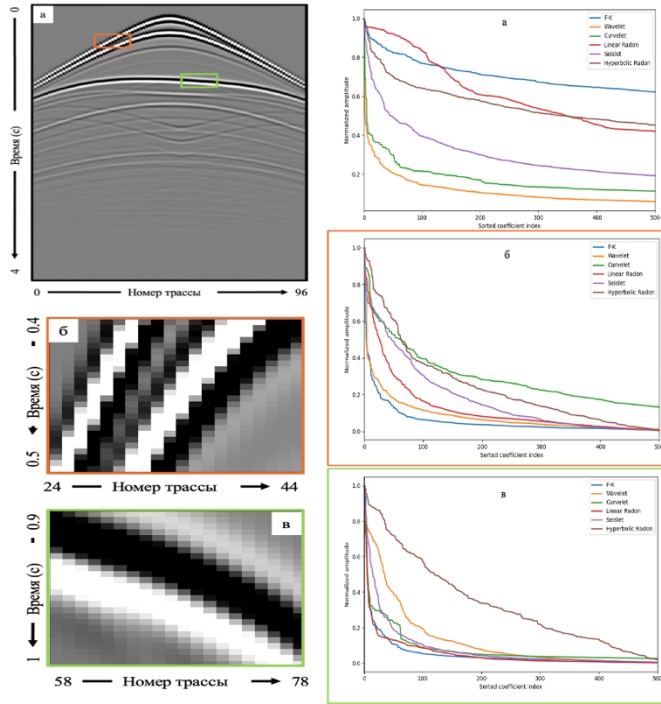


Рисунок 4. Сравнение разреженности различных преобразований. а – для всей сейсмограммы целиком, б – для оранжевого окна, для зеленого окна

Раздел 2.5 посвящен анализу матрицы смешивания Γ , которая содержит в себе информацию о времени возбуждения и амплитуде каждого источника. Каждый ее ряд соответствует определенной позиции выстрела, а каждая колонка отражает отдельное возбуждение, проведенное несколькими перекрывающимися источниками. Элементы матрицы γ_{ij} определяются амплитудой A_{ij} и фазовым сдвигом $-j\omega\Delta t_{ij}$,

зависящим от временного интервала Δt_{ij} , относительно первого источника в эксперименте с несколькими источниками:

$$\gamma_{ij} = A_{ij} e^{-j\omega \Delta t_{ij}} \quad (4)$$

При случайном изменении временных интервалов возбуждения фазы элементов матрицы становятся нерегулярными. Чем больше случайность и величина фазовых сдвигов между последовательными выстрелами, тем более некогерентными будут помехи, что облегчает их подавление на этапе обработки. Показано, что выбор оптимального временного сдвига является ключевым фактором для успешного разделения сигналов. Согласно результатам моделирования, проведенным в работе (Abma, 2012) увеличение случайного временного сдвига, существенно улучшает результат подавления интерференции, а минимальным диапазоном разброса случайных задержек для подавления интерференции от 2 Гц являются значения задержек в диапазоне ± 0.25 с. При этом верхняя граница диапазона случайных задержек ограничена, поскольку увеличение диапазона задержек выше ± 1 с начинает искажать геометрию полевых работ, не обеспечивая при этом существенного прироста случайности интерференции.

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

Раздел 3.1 посвящен созданию синтетического набора смешанных данных на 3D ОПП-наборе данных с регулярной сетью возбуждения 50×50 м (всего 12 800 ПВ), синтетически смешанных по схеме «флип-флоп» со случайной задержкой возбуждений в диапазоне ± 1 секунда и временем на разворот, составляющим от 21.6 до 23.3 минут, что обеспечивает реалистичную проверку алгоритма.

Был проанализирован возникающий на сейсмограммах шум от перекрывающихся источников, который можно охарактеризовать следующим образом:

- Высокоамплитудный в верхних временных интервалах.
- Пространственно-вариативный и случайный.
- Проявляющийся в виде наложенных волновых пакетов и зернистой структуры.
- Существенно затрудняющий интерпретацию глубинных отражений.

Раздел 3.2 описывает процесс выбора параметров инверсии: размера окон 3D F-K преобразования и автоматической настройки частотно-зависимого порога. Представлены панели F-K преобразования

одного локального окна и продемонстрировано, что шум от перекрывающихся источников проявляется в пространстве F-K в виде энергии, «размазанной» по всему диапазону частот и волновых чисел. Задача алгоритма - выделить узкую когерентную часть спектра из «залитого» интерференцией фона.

Проиллюстрирован процесс восстановления сигнала в зависимости от номера итерации алгоритма. Реконструкция 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.

В разделе 3.3 представлены результаты разделения сигналов. Восстановленные сейсмограммы демонстрируют (рисунок 5) значительное подавление интерференционных сигналов и улучшение отношения сигнал/шум (ОСШ), в среднем, на +30 дБ (в 30 раз). При этом форма полезных отражений была сохранена, что указывает на корректность работы алгоритма. Разностные сейсмограммы демонстрируют, что остаточные компоненты представлены в основном низкоамплитудным шумом, не коррелирующим с событиями полезного волнового поля. 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.

Дополнительно был проведен анализ спектра данных до и после подавления интерференции. Спектр смешанных данных характеризуется повышенным уровнем низко- и среднечастотных составляющих, что обусловлено интерференцией сигналов. После применения алгоритма разделения спектр восстановленных данных практически совпадает со спектром исходных, что подтверждает эффективность используемого метода в широком диапазоне частот.

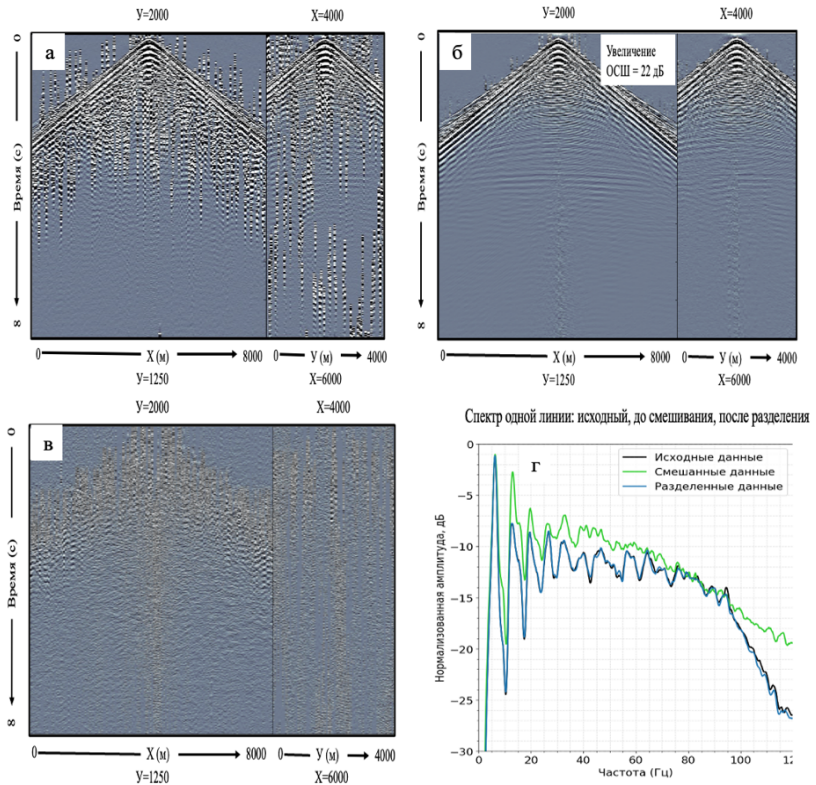


Рисунок 5. а – смешанные данные, б – данные после разделения, в – разность (умноженная на 10), г – спектры до и после подавления интерференции

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

В разделе 4.1 описана методика проведения опытно-методических работ. В качестве приёмной системы применялись донные станции типа «Краб», размещённые по регулярной сети с шагом 200×200 метров. Геометрия расположения источников имела нерегулярный характер (рисунок 6). Всего было выполнено 18 линий возбуждения с межлинейным расстоянием 400 метров. На каждом проходе по профилю (рисунок 7) 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. Только 12 из 18 линий выполнялись с наложением сигналов. За весь период работ было зарегистрировано 6176 возбуждений, из которых 4172 содержали помехи от второго, перекрывающегося источника, тогда как 2004 ПВ были записаны без интерференции.

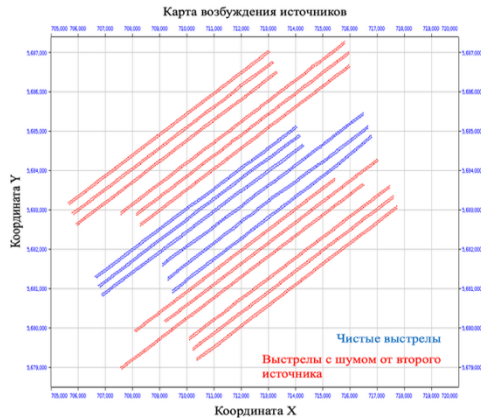


Рисунок 6. Геометрия возбуждения ПВ



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 в одном направлении
- Расстояние между судами 4000 метров
- Обработка профилей началась практически одновременно

Рисунок 7. Методика возбуждения сигналов на опытно-методических работах

Далее был проведен анализ времен возбуждения источников, который показал, что случайная задержка между возбуждениями ПВ не вводилась, и случайность интерференции была вызвана исключительно естественными гидрометеорологическими причинами. Также было выявлено, что времена возбуждения одного из судов были записаны между дискретами. Среднее стандартное отклонение времен возбуждения, обусловленное естественными причинами, для судна «Николай Трубяччинский» составило 0.709 с, а для судна «Вячеслав Тихонов» - 0.368 с, что эквивалентно ориентировочному диапазону случайных смещений между выстрелами ± 0.8 и ± 0.35 с соответственно и является достаточным для проведения дальнейшего разделения. Существенная разница во временах смещения между судами объясняется их различными мореходными характеристиками и точностью определения позиции выстрела. На судне «НТ» было установлено по одному GPS приемнику на одну линию ПИ, когда как на «ВТ» их было по два.

Кроме того, исходный набор данных не включал в себя времена возбуждения выстрелов, сделанных во время процедуры «софт-старт», что в дальнейшем сделало невозможным подавление сигналов от этих возбуждений.

Так как сеть возбуждения ПВ была нерегулярной: число ПВ по линиям различалось, шаг по кросслайну чередовался — 50–400–50 м. Для применения 3D F-K каждая линия по инлайну была приведена к одному числу ПВ (240) с помощью добавления нулевых трасс; по кросслайну изменений не вносилось. Хотя 3D F-K в общем случае предполагает равномерную дискретизацию, прямое и обратное преобразования остаются применимыми. При этом спектральная энергия сохраняет когерентность, что позволяет использовать F-K преобразование, несмотря на риск возможных утечек.

Характер шума на всех сейсмограммах однотипен и проявляется в виде волнообразных пакетов, распределенных по всей временной длине записи. На одной из комбинаций линий ПВ с наибольшим стандартным отклонением 0.592 с, 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.

Несмотря на нерегулярную геометрию съемки, отсутствие времен выстрелов «софт-старт» и случайного аппаратного смещения времен возбуждения, записи времен возбуждения между дискретами –

данный набор данных обладает достаточной некогерентностью интерференции и, с добавлением нулевых трасс в геометрию съемки, может быть использован для анализа работоспособности алгоритма.

Раздел 4.2 посвящен анализу результатов подавления интерференции. На всех линиях достигнуто заметное снижение шумовой составляющей при сохранении фазово-амплитудной структуры первичных событий; выраженных потерь полезного сигнала не наблюдается. Фиксируется локальная утечка полезной энергии на краях некоторых линий ПВ, обусловленная тем, что окно F–K преобразования частично захватывало нулевые трассы. Кроме того, на других ПВ 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 корректному подавлению. Особенно это заметно на ЛПВ 2694, где старт судов был разнесен на 685 с.

Был проведен спектральный анализ результатов: на кривых спектров после подавления интерференции наблюдается небольшое ослабление по всей полосе частот, при этом форма спектра сохранена. На 2D F-K панелях после подавления наблюдается снижение энергии вне конуса скоростей. Спектр становится компактнее и согласованнее, амплитуды полезного сигнала возрастают. На разностном спектре отсутствуют признаки полезного сигнала и наблюдаются лишь горизонтальные полосы, распределенные по всей полосе частот, характерные для шума от смешивания источников. Дополнительно выполнен полосовой разбор результатов по всей полосе частот. На всех представленных панелях отсутствуют признаки подавления сигнала, а интерференция была успешно подавлена. Основываясь на результатах данного анализа (рисунок 8), можно заключить, что представленный алгоритм успешно справился с подавлением шума от перекрывающихся источников.

После проверки на одиночных сейсмограммах алгоритм применён к 47 донным станциям одной приёмной линии; сечения куба (рисунок 9) демонстрируют устойчивое снижение интерференции при сохранении полезных отражений. Локальные артефакты ограничены утечками на краях окон и остатками выстрелов «софт-старт». Разностное изображение содержит преимущественно некогерентный остаток, признаков потери полезного сигнала не выявлено. Интерпретируемость разреза улучшается, а оставшиеся артефакты носят локальный технологический характер.

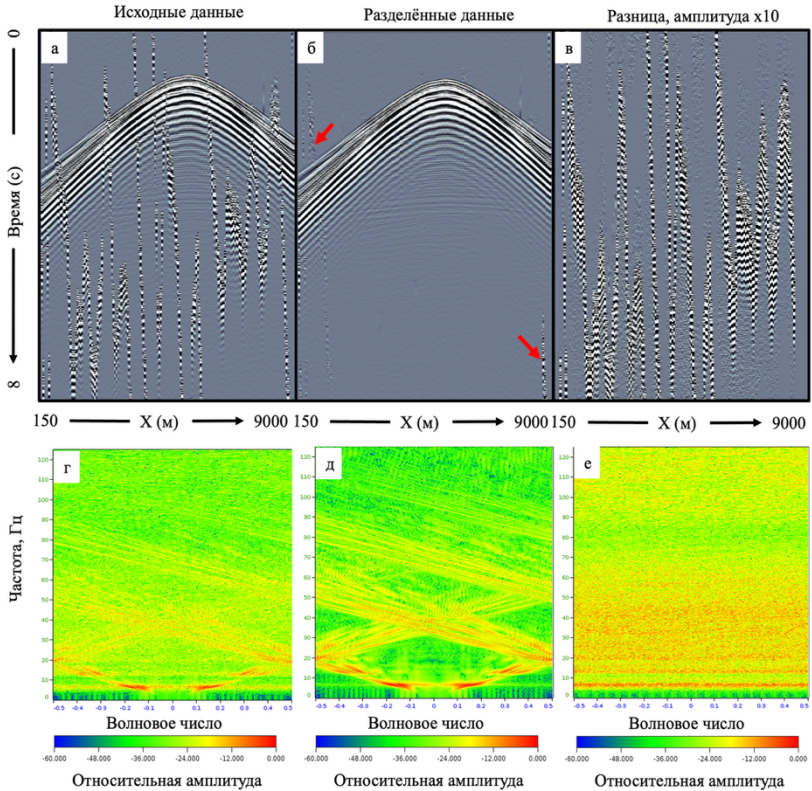


Рисунок 8. Результат подавления интерференции. На (б) красными стрелками показан пример неподвленной интерференции выстрела «софт старт».

Оценка вычислительной трудоемкости показала, что для подавления интерференции в одной сейсмограмме на ПК (core i7, 64 Гб RAM) требуется около часа. Типовой же набор данных (сеть возбуждения 160×160) потребует около 5 часов. Это подтверждает необходимость адаптации алгоритма под серверные системы обработки.

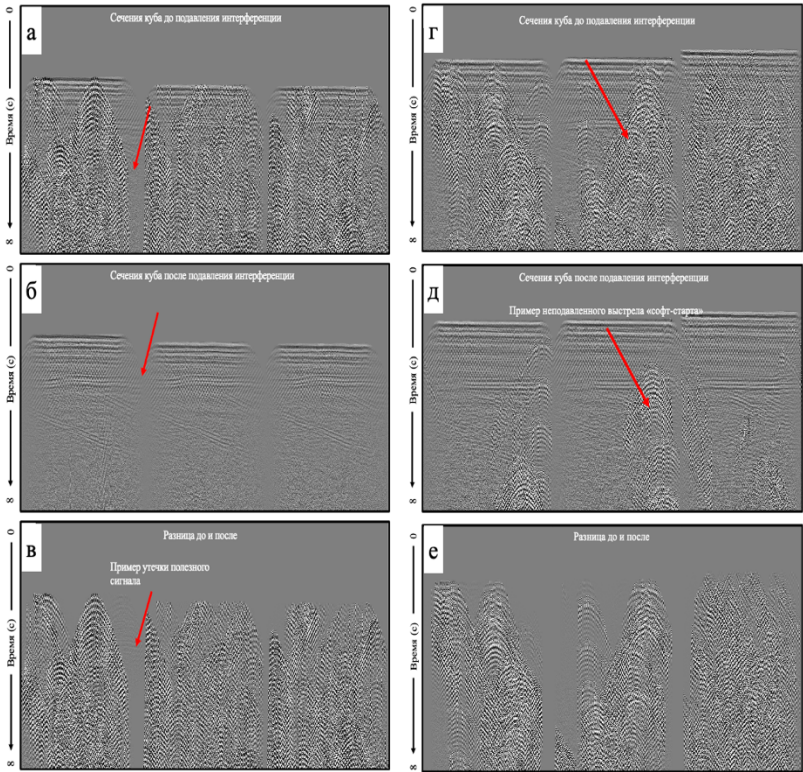


Рисунок 9. Результаты разделения интерференции в различных сечениях куба данных.

В разделе 4.3 приведено обсуждение результатов подавления интерференции. Предложенный в работе алгоритм показал эффективность на синтетических и реальных данных. Вместе с тем выявлены методические ошибки при проведении ОМР, среди которых: отсутствие времен возбуждения «софт-старт», нерегулярная геометрия и отсутствие аппаратных задержек времен возбуждения сигнала. На основании этого сформулированы основные требования к организации полевых работ с перекрывающимися источниками для последующего эффективного подавления интерференции:

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 секунд 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.

Для обеспечения успешного подавления помех от перекрывающихся источников при выполнении полевых работ требуется соблюдение ряда 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.

В рамках исследования разработан алгоритм подавления интерференции на основе разрежённой инверсии с применением метода итеративного жёсткого порога (ИНТ) 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.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе ядра Российского индекса научного цитирования eLibrary Science index:

1. **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.). Импакт-фактор 0,288 (РИНЦ)

Научные статьи, опубликованные в других рецензируемых научных изданиях, включенных в дополнительный список изданий, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ имени М.В. Ломоносова по специальности и отрасли наук:

2. **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.). Импакт-фактор 0,056 (РИНЦ)
3. **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.) Импакт-фактор 0,056 (РИНЦ)
4. 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.). Импакт-фактор 0,056 (РИНЦ)

Иные публикации

1. **Казанин Г.А.**, Гайнанов В.Г., Ткач В.С. Разделение сигналов от перекрывающихся источников с применением разреженной инверсии // ГеоПотенциал-2025. Стратегические векторы развития геолого-геофизических работ в современных реалиях: Сборник материалов научно-практической конференции. ПолиПресс, Тверь: 2025. С. 65-68.(0.4 п.л., авторский вклад 65 %)
2. **Казанин Г.А.**, Гайнанов В.Г., Базилевич С.О., Ткач В.С. Результаты опытно-методических работ с перекрывающимися источниками на шельфе Охотского моря // Труды VIII международной геолого-геофизической конференции «ГеоЕвразия-2025. Геологоразведочные технологии: наука и бизнес», сборник конференции - Том II(III) - ПолиПресс, Тверь: 2025. С. 119–122. (0.4 п.л., авторский вклад 65 %)