

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Матвеев Никита Михайлович

**Технологии повышения устойчивости решения
различных алгоритмов деконволюции**

1.6.9. Геофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2025

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

**Научный
руководитель**

Степанов Павел Юрьевич
кандидат физико-математических наук

**Официальные
оппоненты:**

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

Митрофанов Георгий Михайлович
*доктор физико-математических наук, доцент,
ФГБУН «Институт нефтегазовой геологии и
геофизики имени А.А. Трофимука Сибирского
отделения Российской академии наук»,
лаборатория динамических проблем сейсмики,
главный научный сотрудник*

Гриневский Антон Сергеевич
*кандидат технических наук, ООО «ЛУКОЙЛ-
Инжиниринг», отдел технологий сейсмических
исследований, ведущий геофизик*

Защита диссертации состоится 15 октября 2025 г. в 17 часов 00 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 308.

E-mail: dsmsu0403@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3522>
Автореферат разослан «__» сентября 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета МГУ 016.6,
кандидат технических наук

К.М. Кузнецов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В настоящее время деконволюция является одним из обязательных этапов любого графа обработки данных нефтегазовой сейсморазведки. Качество ее выполнения напрямую влияет на результаты последующих этапов, поскольку процедура в значительной степени изменяет динамические особенности записи.

В обработке наземных сейсмических данных общепринятыми являются поверхностно-согласованные модификации. Тем не менее, их стандартные реализации не учитывают случайно распределенную шумовую составляющую, которая неизбежно присутствует в реальных наборах данных, даже несмотря на предварительное шумоподавление.

Одним из способов решения данной проблемы может стать применение робастных подходов к поверхностно-согласованной деконволюции. Однако их изучение ограничивается незначительным количеством публикаций и соответствующих программных продуктов.

В то же время в литературе встречается большое число описаний нестандартных техник, которые остаются за рамками применения в производстве, но сами по себе могут обладать значительным потенциалом. К ним, в том числе, могут быть отнесены гомоморфные методы.

Степень разработанности

Процедуре деконволюции на данном этапе развития цифровой обработки посвящено большое количество работ отечественных и зарубежных ученых, что говорит о высокой степени изученности вопроса.

Одни из первых публикаций об обратной фильтрации и деконволюции, которые легли в основу дальнейших исследований, появились в середине прошлого века: Robinson, 1954, 1957, 1966; Robinson, Wold, 1963; Robinson, Treitel, 1967, 1969; Peacock, Treitel, 1969.

Появление четырехкомпонентной поверхностно-согласованной модели в сейсморазведке связано с Гурвичем И.И. (Гурвич, 1970). За рубежом данная модель была повторена только спустя 11 лет (Taner, Koehler, 1981). Первая реализация алгоритма поверхностно-согласованной деконволюции была предложена советскими учеными Гольдиным С.В. и Митрофановым Г.М. (Гольдин, Митрофанов, 1973, 1975). Далее, поверхностно-согласованный подход был реализован применительно к задаче деконволюции данных наземной сейсморазведки в различных формах несколькими авторами (Morley,

Claerbout, 1983; Newman, 1986; Levin, 1989; Cambois, Stoffa, 1992; Cary, Lorentz, 1993) в качестве средства достижения более точных и стабильных результатов за счет устранения различий в приповерхностных условиях по профилю/площади.

Изучение возможностей по повышению устойчивости решения процедуры деконволюции проводилось исследователями в различные периоды времени в значительном объеме, однако разработка и применение робастных алгоритмов поверхностно-согласованной деконволюции не получили широкого распространения в литературе. Ключевые публикации, использованные при написании соответствующих разделов данной диссертации, представлены в трудах: Hutchinson, Link, 1984; Bube, Langan, 1997; Kirchheimer, Ferber, 2001; Журавко и др., 2015; Zhang Yuan, Mo Yangang, 2019.

В контексте кепстрального анализа первая основополагающая работа была опубликована Bogert B.P., Healy M.J.R., Tukey J.W. в 1963 г. Наиболее активный интерес к кепстральным преобразованиям (Childers и др., 1977; Steiglitz, Dickinson, 1977; Kanasewich, 1981; Randall, 1981; Stakenborg, 1984) и гомоморфной деконволюции (Ulrych, 1971; Buhl и др., 1974; Stoffa и др., 1974; Lines, 1976; Shensa, 1976; Otis, Smith, 1977; Tribolet, 1977; Сильвия, Робинсон, 1983; Nicolas, 1988) был проявлен учеными в 70 – 80-х годах XX в., однако широкого приложения в сейсморазведке метод так и не получил. Особый вклад в развитие подхода в целом внес Oppenheim A.V. (Oppenheim, 1967; Oppenheim и др., 1976, 1978, 1999, 2004). Более современные работы по данной тематике появляются только на рубеже XX – XXI веков (Mi, Margrave, 1999; Pei Soo-Chang, Lin Huei-Shan, 2005; Smith, Ferguson, 2014; Randall, 2017; Randall и др., 2019), в том числе опубликованные отечественными исследователями (Борисенко, Калайдина, 2010; Митрофанов, 2015).

Цель диссертационной работы заключается в анализе существующих технологий робастных алгоритмов деконволюции и разработке методик по повышению устойчивости решения процедуры.

Задачи

1. Рассмотреть и классифицировать современные методы деконволюции.
2. Установить наиболее эффективные технологии повышения устойчивости решения процедуры деконволюции.
3. Выявить условия применимости различных алгоритмов деконволюции на синтетических и реальных данных.
4. Разработать методики, позволяющие повысить надежность работы процедуры деконволюции.

5. Протестировать и обосновать предлагаемые методики на модельных и реальных данных.

Методология и методы исследования

В рамках написания диссертации были использованы материалы, предоставленные компанией ООО «ПетроТрейс» в следующем составе: сейсмические данные 2D и 3D по Западной и Восточной Сибири, глубинно-скоростная и плотностная модели 2D по Западной Сибири для получения синтетических наборов данных.

Для выполнения определенных выше задач при обработке, моделировании и написании оригинальных алгоритмов применялось специализированное программное обеспечение (ПО):

- численное 2D моделирование в акустическом приближении – Seismic Unix (пакет сейсмических утилит с открытым исходным кодом, который был поддержан Центром волновых явлений при Горной школе Колорадо);
- пикировка первых вступлений, создание моделей верхней части разреза (ВЧР) и расчет статических поправок – Flatirons, GeoTOMO;
- выполнение основного графа обработки данных – Paradigm Echos;
- тестирование существующих алгоритмов деконволюции – Paradigm Echos, Schlumberger Omega;
- программирование авторских алгоритмов гомоморфной деконволюции – среда программирования Matlab с включением различных дополнительных библиотек с открытым исходным кодом.

Научная новизна работы

1. Впервые количественно показаны пределы применимости и степень преобладания робастных поверхностно-согласованных методов деконволюции над стандартными алгоритмами, а также выполнено численное сравнение различных робастных алгоритмов деконволюции в зависимости от процентного содержания зашумленных трасс во входном наборе данных и частотного состава помехи.

2. Разработана и опробована новая методика дополнительной предобработки данных до поверхностно-согласованной деконволюции, позволяющая нивелировать отрицательное влияние на результат процедуры деконволюции помех, сконцентрированных в узкочастотном диапазоне, и получить более разрешенное решение.

3. Разработаны и реализованы в виде компьютерных программ новые оригинальные алгоритмы гомоморфной потрассной и поверхностно-согласованной деконволюции, которые по результатам

тестирования демонстрируют ряд преимуществ относительно стандартных методов.

Теоретическая и практическая значимость

Проведенный комплексный сравнительный анализ стандартных и робастных алгоритмов поверхностно-согласованной деконволюции при различной степени зашумленности данных позволяет более оптимально подходить к выбору типа деконволюции при выполнении обработки, а также показывает условия применимости каждого метода.

Предложенная методика специальной предобработки данных перед выполнением поверхностно-согласованной деконволюции была опробована на реальном производственном проекте компании ООО «ПетроТрейс» и продолжает находить применение.

Изучение и обобщение теоретических основ кепстрального анализа привело автора к синтезу оригинальных алгоритмов гомоморфной деконволюции, которые были запрограммированы в ходе работы и могут быть использованы для производственных задач. Поверхностно-согласованный кепстральный алгоритм, обладающий наибольшим потенциалом, предполагается внедрить в действующий программный комплекс для обработки компании ООО «ПетроТрейс» с целью более широкого тестирования на различных наборах данных.

Защищаемые положения

1. Применение робастного алгоритма поверхностно-согласованной деконволюции к данным, содержащим осложненные высокоамплитудным случайным шумом трассы в количестве до 35% от всего набора, позволяет получить в среднем более чем на 10% разрешенный результат процедуры по сравнению со стандартным алгоритмом поверхностно-согласованной деконволюции.

2. При наличии в сейсмических данных помех, сконцентрированных в узком частотном диапазоне, предложенная методика дополнительной предобработки для несмещенной спектральной оценки в ходе робастной поверхностно-согласованной деконволюции обеспечивает более устойчивое решение с расширением спектра на порядка 0.5 октавы больше относительно результата без предобработки.

3. Представленный в диссертации оригинальный метод поверхностно-согласованной кепстральной деконволюции способствует лучшему пространственному выравниванию амплитуд и компенсации различий в условиях возбуждения и приема.

Апробация работы и степень достоверности

Основные тезисы и результаты диссертационной работы были представлены на 11-ой международной геолого-геофизической

конференции «Санкт-Петербург 2024. Геонауки: современные вызовы и пути решений», Санкт-Петербург, 2024; на «Научной конференции молодых учёных и аспирантов ИФЗ РАН-2024», Москва, 2024; на международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2025», Москва, 2025; на VII международной геолого-геофизической конференции и выставке «ГеоЕвразия-2025. Геологоразведочные технологии – наука и бизнес», Москва, 2025.

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 5 статьях в рецензируемых научных журналах, рекомендованных для защиты в МГУ.

Личный вклад автора

Автор совместно с коллегами из компании ООО «ПетроТрейс» принимал непосредственное участие в выборе графа и оптимальных параметров процедур временной обработки для представленных в работе реальных материалов 2D и 3D сейсморазведки, в том числе настройке параметров на этапе деконволюции (Королев и др., 2023; Матвеев и др., 2024; Матвеев и др., 2025).

Для целей сравнительного анализа стандартных и робастных алгоритмов деконволюции автором лично была спроектирована геометрия системы наблюдений и выполнено численное моделирование 2D данных (Королев и др., 2023). Также совместно с коллегами осуществлялось моделирование наборов со случайно распределенным высокоамплитудным белым и низкочастотным шумом; при участии коллектива ООО «ПетроТрейс» автором была предложена и разработана методика специальной предобработки данных до деконволюции (Матвеев и др., 2025).

Все описанные в диссертации гомоморфные алгоритмы деконволюции были самостоятельно разработаны и запрограммированы автором. Автор лично осуществлял подготовку, выгрузку, анализ и обработку данных в кепстральной области (Матвеев и др., 2024; Матвеев, Степанов, 2024; Матвеев, Степанов, 2025).

Во всех опубликованных работах вклад автора является определяющим. Полученные в рамках исследования робастного подхода к деконволюции результаты были подготовлены к публикации совместно с Д.А. Королевым (Королев и др., 2023). Автор принимал активное участие в формулировании научных задач, обобщении и построении теоретического базиса, анализе итоговых материалов и передаче их в печать. Автором была проделана существенная работа

над текстом статей, включая их предоставление в редакции журналов, а также ведение переписки с редакторами и рецензентами.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав и заключения. Содержание работы изложено на 136 страницах, включая 1 таблицу, 56 рисунков. Список используемой литературы включает 127 наименования.

Благодарности

Автор благодарит своего научного руководителя доцента Степанова Павла Юрьевича за конструктивное сотрудничество, комфортное взаимодействие, ценные наставления и помощь на всех этапах выполнения работы.

Автор выражает искреннюю признательность всему коллективу компании ООО «ПетроТрейс», в особенности Королеву Александру Евгеньевичу за всестороннюю поддержку и участие, Шевченко Алексею Александровичу за полезные замечания и советы, Баранову Константину Владимировичу за равнодушие и заинтересованность, Романчуку Анатолию Александровичу, Радионову Илье Юрьевичу и Денисовой Наталье Борисовне за формирование навыков обработки сейсморазведочных данных.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлено содержание работы, обоснована актуальность темы и сформулированы задачи, стоящие перед автором в ходе исследования. Основная идея диссертации заключается в разработке практических подходов по повышению устойчивости решения деконволюции и в реализации гомоморфных алгоритмов.

Глава 1. Обзор методов деконволюции

Анализ развития методов деконволюции позволяет выделить несколько ключевых тенденций. Во-первых, это постепенный переход от линейных стационарных моделей к нелинейным и нестационарным подходам, лучше учитывающим реальные свойства геологических сред. Во-вторых, увеличение роли статистических методов и байесовского подхода в решении обратных задач. В-третьих, постоянное совершенствование вычислительных алгоритмов, связанное с ростом производительности компьютерной техники. И наконец, все более тесная интеграция методов деконволюции с другими этапами обработки сейсмических данных, особенно с миграцией и инверсией.

Исторический опыт показывает, что развитие методов деконволюции всегда шло в тесной связи с прогрессом в смежных областях науки – цифровой обработке сигналов, теории информации, вычислительной математике.

Дальнейшее развитие методов деконволюции, несомненно, откроет новые перспективы для сейсморазведки, особенно в условиях усложняющихся объектов поиска и возрастающих требований к точности и достоверности результатов.

Глава 2. Теоретические основы деконволюции

Сверточная модель сейсмической трассы. Допущения деконволюции

Для понимания основ деконволюции необходимо рассмотреть одномерную *сверточную модель сейсмической трассы*, которая используется в сейсморазведке.

Сверточная модель, предложенная Э.А. Робинсоном в 1954 г. (Robinson, 1954), предполагает, что сейсмическая трасса есть свертка импульсной характеристики среды с сигнатурой используемого источника:

$$tr(t) = w(t) * k(t) + n(t) \quad (1)$$

Здесь $tr(t)$ – записанная сейсмотрасса, $w(t)$ – сигнатура источника, $k(t)$ – импульсная характеристика среды, $n(t)$ – аддитивная компонента случайного шума, $*$ – оператор свертки.

На практике, в выражении (1) известной составляющей обычно является только записанная сейсмотрасса $tr(t)$, поэтому для корректной работы деконволюции требуется выполнение ряда предположений. Несмотря на то, что зачастую все вместе они выполняются редко, деконволюция дает удовлетворительные результаты, так как имеет математическое обоснование.

Предположение 1. Среда считается горизонтально-слоистой с постоянными скоростями в пределах слоев.

Предположение 2. Источник упругих колебаний генерирует плоскую продольную волну, ее падение на границы раздела нормальное.

Предположение 3. Сигнатура источника известна и стационарна.

Предположение 4. Компонента случайного шума считается нулевой.

Предположение 5. Импульс источника минимально-фазовый.

Предположение 6. Серия коэффициентов отражения представляет собой случайный процесс.

Винеровская фильтрация. Основные типы деконволюции

На сегодняшний день алгоритмы деконволюции, базирующиеся на фильтрации Винера, являются наиболее широко распространенными в обработке. В общем виде матричное выражение для нахождения коэффициентов оператора деконволюции (фильтра Винера) имеет следующий вид:

$$\begin{bmatrix} r_0 & r_1 & r_2 & \dots & r_{n-1} \\ r_1 & r_0 & r_1 & \dots & r_{n-2} \\ r_2 & r_1 & r_0 & \dots & r_{n-3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n-1} & r_{n-2} & r_{n-3} & \dots & r_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_0 \\ h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_0 \\ g_1 \\ g_2 \\ \vdots \\ g_{n-1} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Здесь r_i — коэффициенты автокорреляционной функции (АКФ) входной последовательности (в сейсморазведке — обычно сеймотрассы), образуют матрицу Toeplitz, которая является симметричной, h_i — коэффициенты фильтра Винера, g_i — коэффициенты функции взаимной корреляции (ФВК) желаемого результата и входной последовательности, $i = 0, 1, 2 \dots n - 1$ — индекс, обозначающий временную задержку (Yilmaz, 2001).

Желаемым результатом *деконволюции сжатия* является единичный импульс с нулевой задержкой $(1, 0, 0, \dots, 0)$. Выражение для деконволюции сжатия имеет вид:

$$\begin{bmatrix} r_0 & r_1 & r_2 & \dots & r_{n-1} \\ r_1 & r_0 & r_1 & \dots & r_{n-2} \\ r_2 & r_1 & r_0 & \dots & r_{n-3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n-1} & r_{n-2} & r_{n-3} & \dots & r_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_0 \\ h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Предсказывающая деконволюция используется для получения продвинутой во времени входной последовательности и основывается на прогнозировании:

$$\begin{bmatrix} r_0 & r_1 & r_2 & \dots & r_{n-1} \\ r_1 & r_0 & r_1 & \dots & r_{n-2} \\ r_2 & r_1 & r_0 & \dots & r_{n-3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n-1} & r_{n-2} & r_{n-3} & \dots & r_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_0 \\ h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_\alpha \\ r_{\alpha+1} \\ r_{\alpha+2} \\ \vdots \\ r_{\alpha+n-1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

В целом предсказывающая деконволюция может иметь два основных назначения:

- Использование малых (близких к шагу дискретизации) *интервалов предсказания* (α) приводит к увеличению временной разрешающей способности;

- Предсказанная часть трассы, продвинутая во времени, применяется для подавления кратных отражений (Dondurur, 2018; Yilmaz, 2001).

Целью *поверхностно-согласованной деконволюции* является коррекция амплитудных и фазовых вариаций, вызванных неидентичностью условий возбуждения и приема сигнала, плохим контактом с грунтом и различием в приповерхностных условиях по

профилю/площади (Боганик, Гурвич, 2006; Митрофанов, 2018). Для поверхностно-согласованной деконволюции предложена (Гурвич, 1970) следующая сверточная модель сейсмической трассы в так называемой поверхностно-согласованной форме (без учета составляющей случайных помех):

$$tr_{i,j}(t) = w(t) * s_i(t) * r_j(t) * off_{\frac{i-j}{2}}(t) * k_{\frac{i+j}{2}}(t) \quad (5)$$

Здесь $w(t)$ — исходная стабильная сигнатура источника; $s_i(t)$ — компонента влияния источника, расположенного на i -ом ПВ (пункте возбуждения); $r_j(t)$ — компонента влияния приемника, расположенного на j -ом ПП (пункте приема); $off_{\frac{i-j}{2}}(t)$ — компонента влияния удаления для i -ого ПВ и j -ого ПП; $k_{\frac{i+j}{2}}(t)$ — импульсная характеристика среды в общей глубинной точке (ОГТ), находящейся между i -ым ПВ и j -ым ПП.

Робастная поверхностно-согласованная деконволюция

Классически, линеаризованный вариант переопределенной системы (5) решается с помощью метода наименьших квадратов (МНК) или его модификаций. При этом случайно распределенная шумовая составляющая не будет включена в модель, что может являться причиной ошибок в решении, поэтому при обработке всё чаще прибегают к использованию *робастных методов деконволюции*. Под робастностью понимается устойчивость метода к различного рода выбросам и помехам. Выделяются два основных направления для повышения устойчивости или их комбинации:

1. *На этапе поверхностно-согласованной декомпозиции:* использование более сложных методов, чем МНК.

2. *На этапе непосредственно деконволюции:* включение дополнительных опций при построении и применении обратных операторов (Kirchheimer, Ferber, 2001; Журавко, Адамович, 2015).

Кепстральный анализ и гомоморфная деконволюция

Оригинальное определение (*энергетического*) *кепстра* было дано Б.П. Богертом и др. в статье 1963 г. как квадрат модуля обратного преобразования Фурье от натурального логарифма энергетического спектра сигнала (Bogert и др., 1963).

К настоящему моменту основными элементами кепстрального анализа являются *действительный* и *комплексный кепстры*, соответственно:

$$C_r(\tau) = IFT\{\ln |FT\{x(t)\}|\} = IFT\{\ln(A(f))\} \quad (6)$$

$$C_c(\tau) = IFT\{\ln FT\{x(t)\}\} = IFT\{\ln\{A(f)e^{j\varphi(f)}\}\} = IFT\{\ln(A(f)) + j\varphi(f)\} \quad (7)$$

Здесь τ – *кьюфренси*, независимая переменная в кепстральной области, имеющая единицы измерения времени, FT и IFT – прямое и обратное преобразование Фурье, $x(t)$ – функция сигнала; $A(f)$ и $\varphi(f)$ – амплитудный и фазовый спектры сигнала (Randall, 1981, 2017).

Гомоморфная деконволюция, которая базируется на кепстральном анализе, была введена Р.В. Шафером и А.В. Оппенгеймом. Данный метод включает в себя преобразование из пространства сверток в аддитивное пространство, в котором функции импульса и трассы коэффициентов отражения могут иметь характеристики, допускающие их разделение, невозможное в исходном сверточном пространстве. Следовательно, возникает возможность для разделения функций, занимающих неперекрывающиеся диапазоны, то есть для выполнения гомоморфной деконволюции (Lines, 1976; Oppenheim и др., 1976; Oppenheim, Tribolet, 1978; Otis, Smith, 1977; Peardon, Evans, 1991; Tribolet, Oppenheim, 1977; Ulrych, 1971).

Глава 3. Исследование робастного подхода к поверхностно-согласованной деконволюции

Сравнение робастного (*медианного*) и стандартных алгоритмов поверхностно-согласованной деконволюции

В ходе эксперимента было рассмотрено три типа поверхностно-согласованной деконволюции: *упрощенный*, *стандартный*, *робастный*. Тестирование алгоритмов и обработка проводились с помощью пакета Echos программного комплекса Paradigm.

Первый (*упрощенный*) подход заключается в усреднении АКФ по ансамблям в различных сортировках.

Для второго (*стандартного*) метода решение переопределенной системы при декомпозиции определяется путем общепринятой минимизации по норме L2, то есть по МНК (Newman, 1986).

Третий – *робастный медианный* метод. В нем минимизация ошибок решения при декомпозиции достигается с помощью медианного итеративного алгоритма, обеспечивающего лучшее приближение по норме L1 (аналог метода наименьших модулей (Hutchinson, Link, 1984). Такое решение будет обладать большей устойчивостью к шумам и спектральным оценкам низкого качества, чем МНК.

Для тестирования различных алгоритмов деконволюции были рассчитаны синтетические данные 2D в акустическом приближении по модели одного из месторождений Западной Сибири.

Следующим этапом было получение наборов данных с включением зашумленных трасс от 5% до 90% от общего числа: случайный шум добавлялся аддитивно, амплитуда шума значительно

превышала амплитуду сигнала, совокупность трасс для зашумления выбиралась в случайном порядке. По полученным сейсмограммам с шумом выполнялось построение операторов деконволюции. Далее, к исходным наборам без шума применялись вычисленные операторы, чтобы оценить эффективность их расчета для каждого из методов.

Здесь и далее для обеспечения конструктивного сравнения алгоритмов **использовались одинаковые параметры для различных методов и робастность только на этапе декомпозиции.**

Непосредственные результаты эксперимента представлены в виде атрибутов контроля качества «преобладающая частота» и «ширина спектра» (рис. 1).

- *Упрощенная* метод становится неэффективным уже на 5%, хотя на 0% результат даже лучше, чем для *стандартной*.
- *Стандартный* метод характеризуется плавными изменениями для обоих атрибутов. Даже при 30% шумящих трасс алгоритм достаточно эффективно сжимает импульс.
- *Робастный* алгоритм обеспечивает наибольшее временное разрешение: графики атрибутов для него имеют преобладающее положение относительно других зависимостей вплоть до 40% по «преобладающей частоте» и 50% по «ширине спектра».

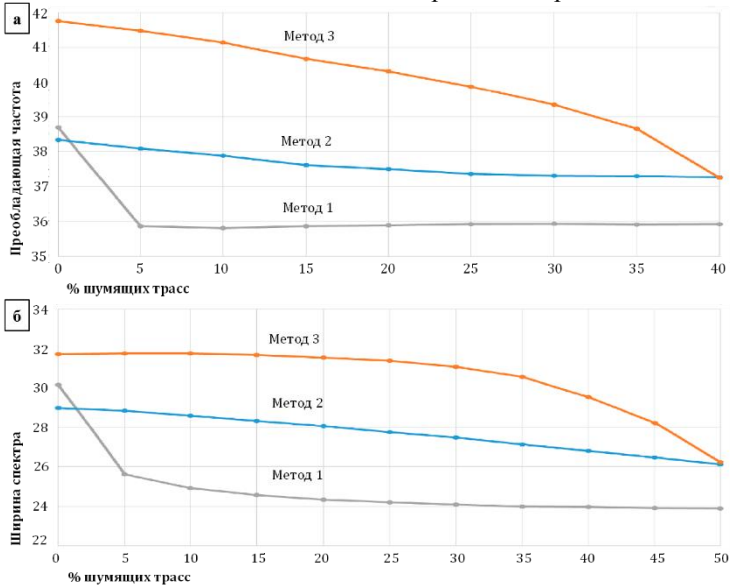


Рисунок 1. Графики зависимостей атрибутов "преобладающая частота" (а) и ширина спектра (б) от количества зашумленных трасс, присутствующих в

наборе при оценке компонент записи, для каждого из трех методов поверхностно-согласованной деконволюции: упрощенного (метод 1), стандартного (метод 2), робастного (метод 3).

Также для стандартного и робастного методов был рассчитан процентный прирост по атрибутам относительно их эталонных значений для набора до деконволюции без добавления шума (ширина спектра – 24 Гц, преобладающая частота – 36 Гц). Далее, на отрезке от 0 до 35% зашумления (область преобладания робастного алгоритма по обоим атрибутам) были получены разностные графики процентного прироста между робастным и стандартным методами (рис. 2). Средняя разность между алгоритмами по ширине спектра составила 14%, по преобладающей частоте – 8%; среднее значение по обеим величинам составило 11%. Последний показатель является наиболее важным, поскольку представляет собой интегральный параметр, количественно характеризующий процентное улучшение временного разрешения результата робастного метода по сравнению с результатом стандартного алгоритма.

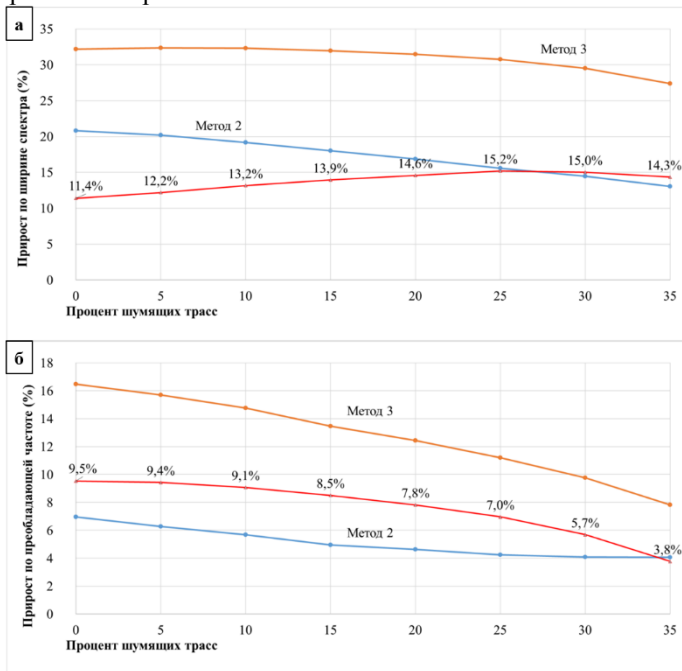


Рисунок 2. Графики процентного прироста ширины спектра (а) и преобладающей частоты (б) относительно эталонного значения атрибута

(для набора до деконволюции без добавления шума) для стандартного (метод 2) и робастного (метод 3) методов поверхностно-согласованной деконволюции. Красным цветом показан разностный график между двумя указанными методами.

Исследуемые три подхода также были опробованы на реальной взрывной съемке 2D с низким соотношением сигнал/шум. Все методы деконволюции применялись с одинаковыми параметрами. По АКФ (рис. 3) отмечается, что результат после робастного метода оказался наиболее разрешённым по вертикали: ширина главного максимума несколько уже, а величина первого побочного минимума значительно меньше, чем для упрощенного и стандартного алгоритмов.

Проведённый эксперимент позволил, с одной стороны, выявить преимущества робастной реализации поверхностно-согласованной деконволюции, а с другой – детально изучить работу стандартных алгоритмов (Королев и др., 2023).

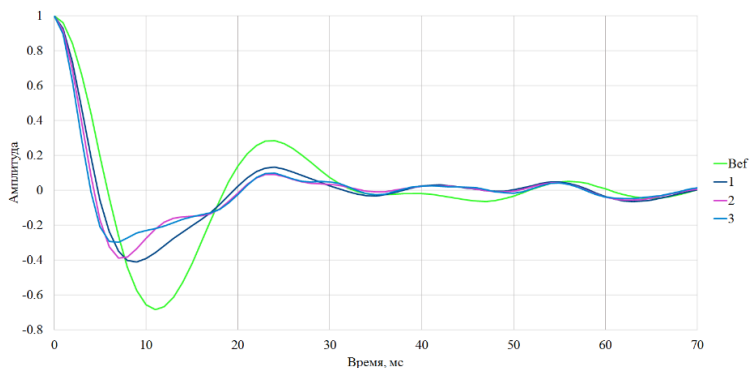


Рисунок 3. Функции автокорреляции по суммарным разрезам ОСТ до и после применения деконволюции к реальным данным. В легенде справа указано: до деконволюции (Bef), после упрощенного (1), стандартного (2) и робастного (3) методов.

Сравнение робастных (медианного и гибридного) алгоритмов поверхностно-согласованной деконволюции

В рамках эксперимента было рассмотрено два алгоритма робастной поверхностно-согласованной деконволюции, для краткости обозначения: *медианный* и *гибридный*; **использовалась только робастность на этапе декомпозиции**. Медианный алгоритм был описан ранее. В гибридном алгоритме при декомпозиции вводится гибридная норма L1/L2. Метод заключается в итеративном сравнении значения рассчитанной невязки между входным и модельным

спектрами. Так, если стандартное решение для компоненты по норме L2 содержит высокое значение ошибки, веса этого уравнения пересчитываются таким образом, что решение будет выполняться по аналогу нормы L1.

Сравнение алгоритмов проводилось аналогичным образом и по тем же модельным данным, как и в предыдущей части исследования. По атрибутам «преобладающая частота» и «ширина спектра» видно, что графики характеризуются плавным спадом, однако в *медианном* алгоритме для значений 40-55% на графиках наблюдается сильный излом. Эта особенность объясняется различием алгоритмов и нестабильностью медианного решения при приблизительно равном соотношении «шумных» и «сигнальных» трасс (рис. 4а, б). На сейсмограммах этот эффект отражается в виде **неравномерного распределения амплитуд по латерали**.

Так как при 0% шума алгоритмы не эквивалентны в абсолютных атрибутах, был получен относительный атрибут среднеквадратического отклонения от эталона АКФ ввиду несмещенности такой оценки. *Медианный* метод имеет несколько лучший результат в сравнении с *гибридным* в условиях зашумленности данных до 35%; от 35% и выше метод *гибридной* деконволюции работает эффективнее и стабильнее (рис. 4в).

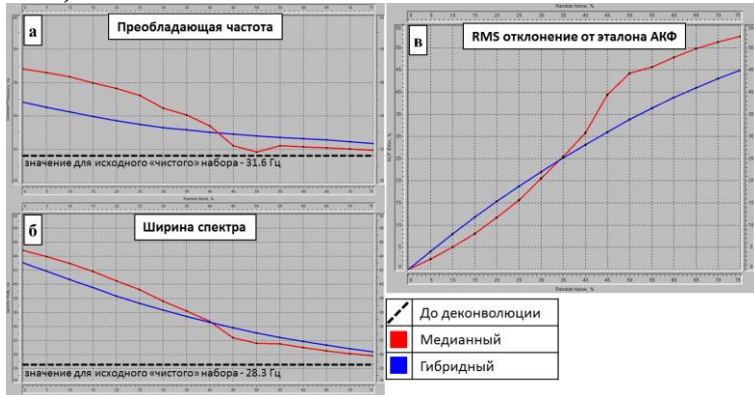


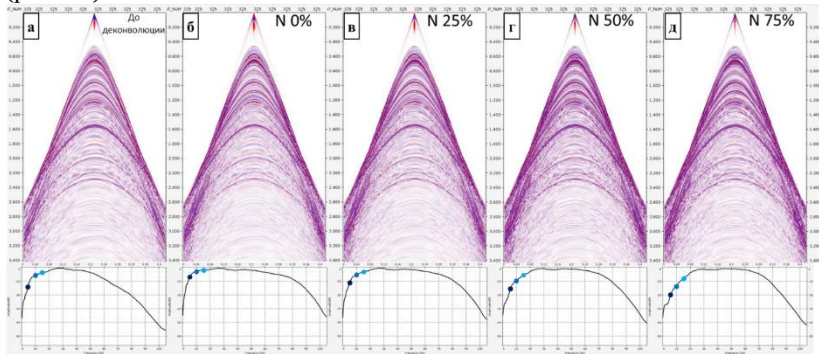
Рисунок 4. Графики зависимостей атрибутов «преобладающая частота», «ширина спектра» и «RMS отклонение от эталона АКФ» от количества (процента) трасс с добавлением белого шума, присутствующих в наборе при оценке компонент записи, для каждого метода.

Оценка влияния частотного состава шумовой компоненты на результат робастной поверхностно-согласованной деконволюции

Белый шум, в зависимости от своего количества приводят к снижению эффективности деконволюции (степени сжатия), однако не порождает «провалов» в амплитудных спектрах. Тем не менее, если помехи сконцентрированы в узком частотном диапазоне и имеют повышенный уровень амплитуд, то в этом случае результат деконволюции может содержать ошибки решения. Для подтверждения этого был выполнен следующий эксперимент: использовался гибридный алгоритм, однако, случайный шум в данных был преобразован в высокоамплитудные низкочастотные помехи.

При анализе результирующих сейсмограмм и амплитудных спектров прослеживается нежелательное «перетекание» энергии в область высоких частот и смещение нижней граничной частоты (рис. 5).

Далее, был выполнен анализ атрибутов в сравнении с вариантом со случайным шумом. На графиках «ширины спектра» и «преобладающей частота» для данных с низкочастотными помехами эффект «перекачки» энергии в область высоких частот подтверждается (рис. 6а, б), также среднеквадратическое отклонение от эталона АКФ оказывается гораздо большим даже при небольшом проценте шума (рис. 6в).



Значение АЧХ на: ● - на 5 Гц ● - на 10 Гц ● - на 15 Гц

Рисунок 5. Сейсмограммы ОПВ и соответствующие им спектры до (а) и после деконволюции по гибричному алгоритму. В верхнем углу для каждого ансамбля указан процент трасс с добавлением низкочастотного шума в наборе, по которому оценивались компоненты записи: 0% (б), 25% (в), 50% (г), 75% (д).

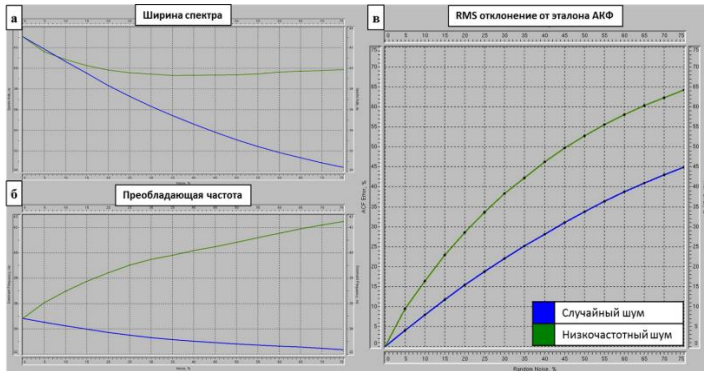


Рисунок 6. Графики зависимостей атрибутов «преобладающая частота», «ширина спектра» и «RMS отклонение от эталона АКФ» от количества (процента) трасс с добавлением белого и низкочастотного шума, присутствующих в наборе при оценке компонент записи, для гибридного алгоритма.

Дальнейший тест был проведен на реальных 3D данных нефтегазовой сейсморазведки по Восточной Сибири. Специфика данного набора заключалась в высоком фоне остаточных помех в области низких частот, поскольку в рамках шумоподавления до деконволюции не использовались любые когерентные фильтры, которые могут привести к замешиванию трасс, имеющих значительные различия в спектральных характеристиках и форме импульса.

Смысл тестирования на реальных данных заключался в специальной предобработке перед расчетом операторов деконволюции, то есть в максимальной очистке сейсмограмм от помех для минимизации шумового смещения спектральной оценки и расчета более эффективных операторов деконволюции в области низких частот.

При выполнении деконволюции с использование специальной предобработки данных на временных разрезах наблюдается повышение уровня низких частот: прирост амплитуд на 10 Гц составляет порядка 6 дБ по сравнению с результатом деконволюции без предобработки. Специальная предобработка позволяет нивелировать отличия в низкочастотной области спектра в наборах до и после деконволюции. (рис. 7).

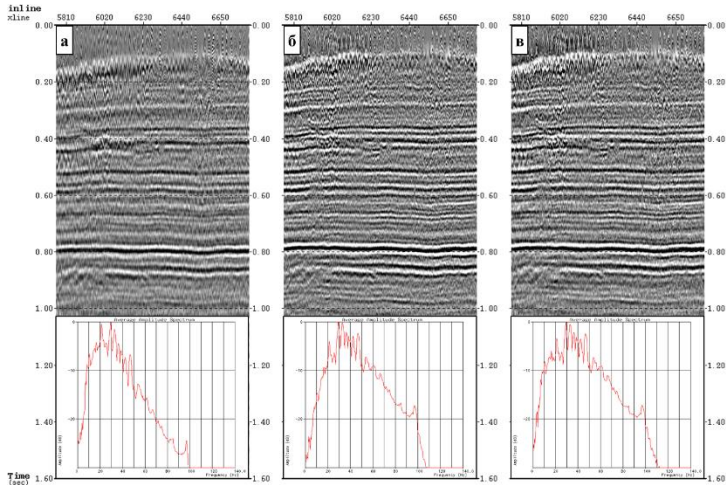


Рисунок 7. Фрагменты суммарных разрезов ОСТ и соответствующие им амплитудные спектры: до деконволюции (а), после деконволюции без специальной предобработки (б) и со специальной предобработкой (в).

Для количественного анализа результатов был рассчитан пространственный атрибут «ширина спектра» в октавной системе, который позволяет косвенно оценить уровень низких частот в сигнале. Карта атрибута и его среднее значение по площади для данных после деконволюции без предобработки (рис. 8) характеризуются меньшими величинами, чем данные до деконволюции (рис. 9). Данный факт объясняется ослаблением низких частот для деконволюции без предобработки. В свою очередь, использование специальной предобработки обеспечивает наиболее разрешенный и стабильный результат за счет компенсации низкочастотной области спектра и его равномерного расширения в направлении высоких частот (рис. 10); в среднем прирост ширины спектра относительно результата без предобработки достигает порядка 0.5 октавы.

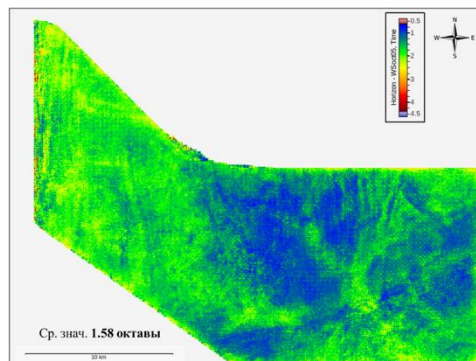


Рисунок 8. Карта атрибута "ширина спектра" (октавы) после деконволюции без применения специальной предобработки.

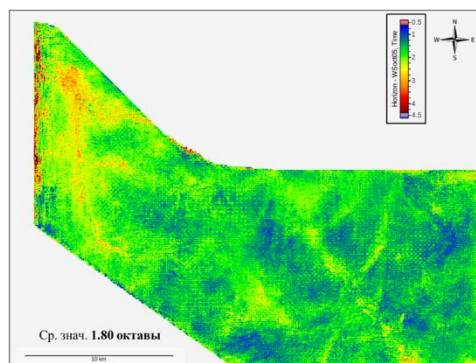


Рисунок 9. Карта атрибута "ширина спектра" (октавы) до деконволюции.

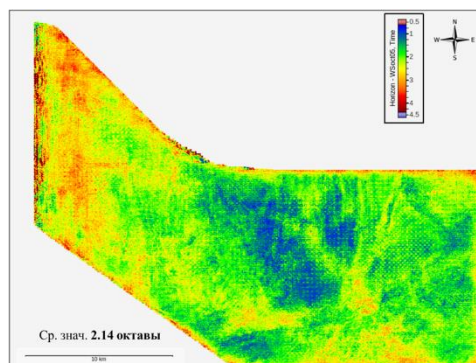


Рисунок 10. Карта атрибута "ширина спектра" (октавы) после деконволюции с применением специальной предобработки.

Глава 4. Гомоморфные алгоритмы деконволюции: разработка и применение

Тестирование алгоритмов гомоморфной деконволюции на синтетических данных

Первоначально были опробованы одноканальные гомоморфные алгоритмы на синтетических данных. Эталонном эффективности их работы было принято сходство с результатами деконволюции сжатия.

Автором были разработаны, запрограммированы и протестированы следующие гомоморфные алгоритмы: *метод кепстральной оценки и извлечения сигнатуры источника* и *метод с аналогичной оценкой, но с извлечением импульса с помощью винеровской фильтрации*. Предполагается, что оценка сигнатуры в кепстральной области оказывается более точной, чем статистическая оценка по винеровскому подходу.

Изучаемые виды гомоморфной деконволюции обеспечивают близость в функционировании к деконволюции сжатия по модельным данным, а значит, первые вполне могут находить практическое применение в обработке реальных наборов (рис. 11). При этом полностью гомоморфный алгоритм демонстрирует наиболее точный результат.

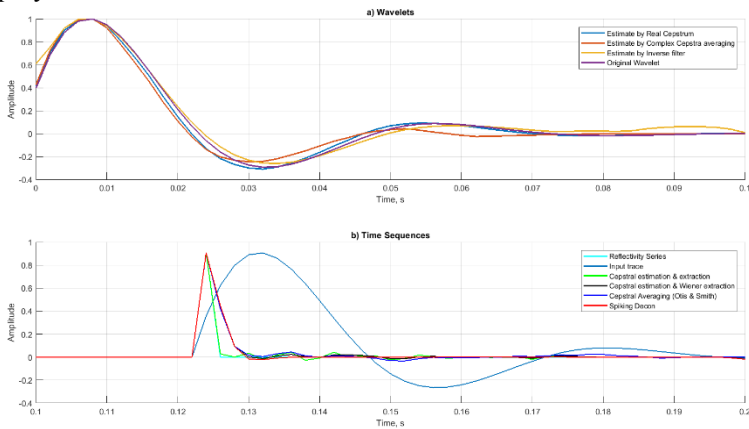


Рисунок 11. Сравнение различных алгоритмов гомоморфной деконволюции и деконволюции сжатия по Винеру (все временные ряды нормированы): оценки импульсов (a); последовательность коэффициентов отражения, исходная трасса и результаты работы алгоритмов деконволюции (b).

Кепстральный анализ и тестирование алгоритмов гомоморфной деконволюции на реальных сейсмических данных 2D по Западной Сибири

Далее, указанные выше кепстральные подходы и деконволюция сжатия применялись к сейсмическому набору 2D (взрывы) по Западной Сибири. Все рассмотренные реализации обеспечивают кондиционные итоговые результаты и близость. Для гомоморфной деконволюции, основанной на *кепстральной оценке и извлечении* сигнатуры, выделяются следующие положительные отличия от других методов: ослабление шумовой составляющей вблизи зоны первых вступлений на сейсмограммах; лучшее выравнивание амплитудных спектров по сейсмограммам; значительное пространственное выравнивание по амплитудам итоговых ансамблей (рис. 12).

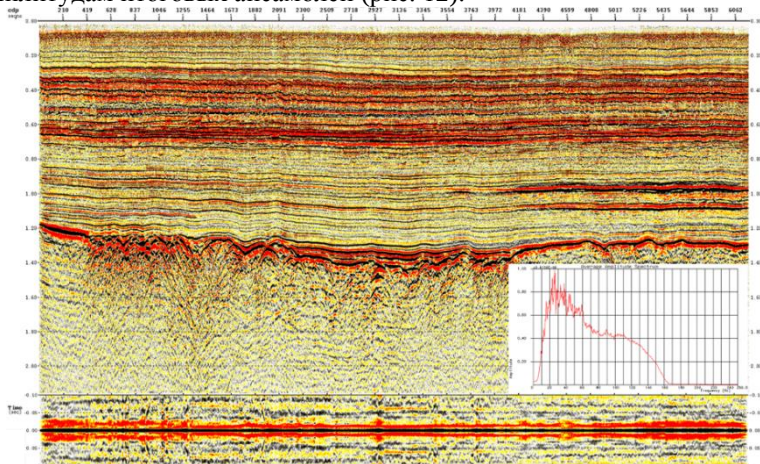


Рисунок 12. Временной разрез, соответствующие ему амплитудный спектр и АКФ после гомоморфной деконволюции по методу кепстральной оценки и извлечения сигнатуры источника.

Наибольшим потенциалом обладает полностью кепстральный подход, поэтому на его базе был разработан поверхностно-согласованный алгоритм для решения реальных задач наземной сейсморазведки. Далее, были проведены его тестирование на тех же данных и сравнение поверхностно-согласованной деконволюцией *стандартным и робастным (медианным) методами*. Результаты двух последних методов схожи. В свою очередь, *гомоморфный* поверхностно-согласованный метод демонстрирует близость в функционировании с *робастным* методом (рис. 13). При этом первый обладает рядом преимуществ: не происходит переусиления высоких

частот, ослабляются шумы и в значительной степени улучшается пространственное распределение амплитуд (рис. 14).

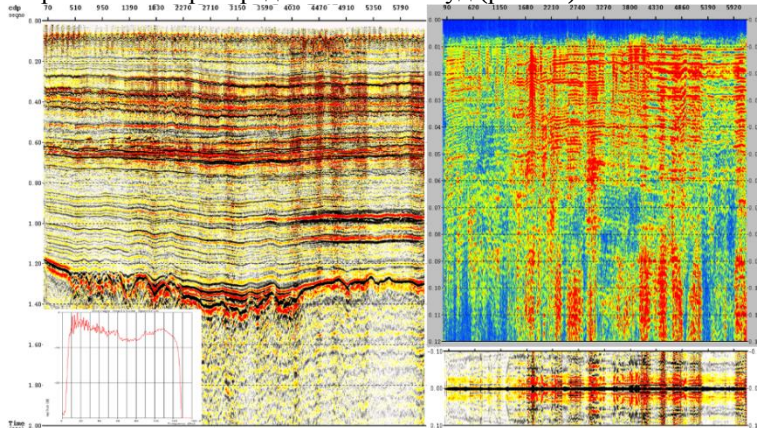


Рисунок 13. Временной разрез, соответствующие ему амплитудный спектр, Fx-секция и АКФ после поверхностно-согласованной деконволюции робастным (медианным) методом.

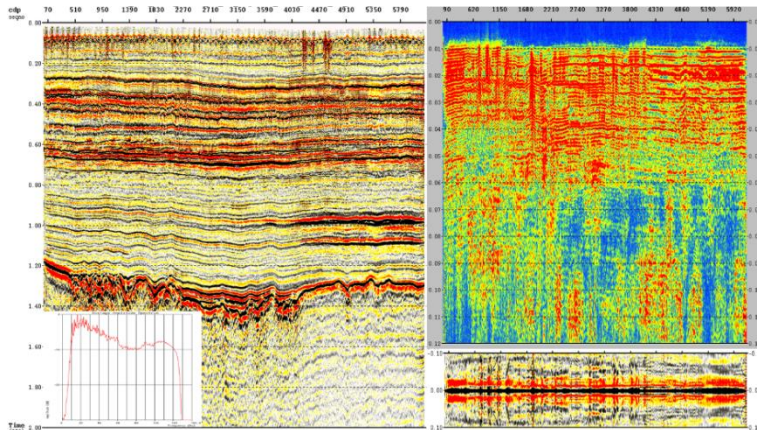


Рисунок 14. Временной разрез, соответствующие ему амплитудный спектр, Fx-секция и АКФ после поверхностно-согласованной деконволюции гомоморфным методом.

Для количественного анализа результатов был рассчитан коэффициент корреляции Пирсона между абсолютными амплитудами, снятыми вдоль двух горизонтов, значительно отличающихся по глубине и волновой картине. При отсутствии влияния приповерхностных условий и в предположении о случайном распределении импульсной

характеристики среды корреляция амплитуд вдоль таких горизонтов должна быть минимальна. Следовательно, в реальных условиях наземной сейсморазведки такой атрибут в первую очередь будет определяться степенью влияния (компенсации) факторов, связанных со свободной поверхностью.

В результате анализа были получены следующие значения коэффициентов корреляции вдоль выбранных горизонтов (рис. 15): 0.43 – до деконволюции; 0.68 – для стандартного метода; 0.58 – для робастного метода; 0.30 – для гомоморфного метода. Гомоморфная деконволюция демонстрирует наименьший коэффициент корреляции Пирсона, что соответствует наилучшему результату среди рассматриваемых алгоритмов.

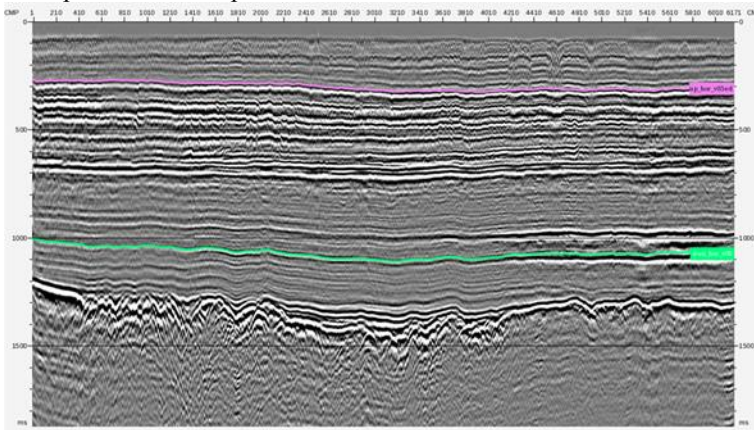


Рисунок 15. Положение горизонтов оценки линейного коэффициента корреляции амплитуд.

Заключение

Первая часть исследования, направленная на сравнение стандартных и робастных алгоритмов в условиях зашумленных данных с преобладанием случайного шума, наглядно демонстрирует преобладание вторых на модельных и реальных наборах в качественных и количественных атрибутах (**защищаемое положение №1**). Более того, было показано, как отличаются два различных робастных метода: медианный и гибридный.

Во втором эксперименте одним из ключевых выводов является деструктивный характер влияния низкочастотных (узкополосных) высокоамплитудных помех на результат деконволюции. Предложена специальная методика предобработки данных до декомпозиции для нивелирования указанных отрицательных эффектов, связанных с

искажением спектральных характеристик в области частот концентрации шума (**защищаемое положение №2**).

Нестандартные гомоморфные методы деконволюции были изучены в третьей части работы. Автором были самостоятельно разработаны и запрограммированы все представленные кепстральные реализации, в том числе поверхностно-согласованная. Несмотря на вычислительные особенности, предложенные гомоморфные алгоритмы оказались сопоставимы со стандартными подходами, при этом для первых выделяется ряд преимуществ (**защищаемое положение №3**).

Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы:

В дальнейшем предполагается разработка оригинальных робастных алгоритмов, изучение вопросов устойчивости непосредственно на этапе деконволюции, оценка влияния различных поверхностных условий на стабильность поверхностно-согласованных реализаций, более широкое тестирование гомоморфных алгоритмов в производственных масштабах, внедрение робастности в кепстральные подходы.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

1. Королев Д.А., **Матвеев Н.М.**, Королев Е.К., Шевченко. А.А. Исследование робастного подхода к поверхностносогласованной деконволюции // Геофизика. №3. 2023. С. 37–44. EDN: HWDJPQ. (0,92 п.л., вклад автора 30%, Импакт-фактор 0,342 (РИНЦ)).

2. **Матвеев Н.М.**, Степанов П.Ю., Королев Д.А. Применение гомоморфной деконволюции при обработке сейсмических съемок с различными источниками // Геофизика. №1. 2024. С. 15–23. EDN: NFDYLP. (1,04 п.л., вклад автора 50%, Импакт-фактор 0,342 (РИНЦ)).

3. **Матвеев Н.М.**, Степанов П.Ю. Применение кепстрального анализа и гомоморфной деконволюции при обработке нуль-фазовых сейсмических данных // Гелиогеофизические исследования. №43. 2024. С. 46–55. EDN: XGQPWA. (1,16 п.л., вклад автора 80%, Импакт-фактор 0,370 (РИНЦ)).

4. **Матвеев Н.М.**, Чертов В.В., Степанов П.Ю. Сравнение алгоритмов робастной поверхностно-согласованной деконволюции и оценка влияния частотного состава шумовой компоненты на результат процедуры // Геофизика. №1. 2025. С. 65–73. EDN: LTZLAK. (1,04 п.л., вклад автора 60%, Импакт-фактор 0,342 (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:

5. **Матвеев Н.М.**, Степанов П.Ю. Применение гомоморфного алгоритма поверхностно-согласованной деконволюции при обработке сейморазведочных данных и его сравнение со стандартными методами // Приборы и системы разведочной геофизики. №2 (85). 2025. С. 72–84. EDN: NQELYX. (1,50 п.л., вклад автора 80%, Импакт-фактор 0,056 (РИНЦ)).