

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Королев Дмитрий Александрович

**Параметрические методы определения и компенсации
искажений сейсмических данных**

1.6.9. Геофизика (технические науки)

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**

Жуков Александр Петрович
доктор технических наук

**Официальные
оппоненты:**

Тихоцкий Сергей Андреевич
доктор физико-математических наук, член-корреспондент 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

Кострыгин Юрий Петрович
доктор технических наук, ООО «Новоросморгео», заместитель генерального директора по научной работе

Защита диссертации состоится 16 апреля 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 308.

E-mail: dmsu0403@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/3364>
Автореферат разослан «__» марта 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета МГУ 016.6,
кандидат технических наук

К.М. Кузнецов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Современная обработка сейсмических данных представляет собой сложный технологический процесс, в котором сформировались устойчивые подходы и методы применения современных компьютерных программ. Применение деконволюции повышает информативность данных, улучшая детализацию и точность отображения геологических структур, что делает тему деконволюции (обратной фильтрации) особенно актуальной. Сегодняшнюю ситуацию с оснащенностью программных пакетов обработки программами деконволюции можно считать достаточной. Тем не менее, остаётся важный вопрос корректности применения программ, а также сохранения частотных и фазовых характеристик сигналов, отраженных от геологических поисковых объектов, коллекторов нефтегазовых залежей.

Параметрический подход к сравнению и компенсации искажений дает возможность контролировать качество выполняемых процедур деконволюции. Разведка нефтегазовых месторождений усложняется, и в обработку включаются сейсмические съемки, выполненные с различными источниками и зарегистрированные с использованием разных систем наблюдения. Требуется выполнение сравнения и коррекции сейсмических данных. Все это и определяет актуальность разработки параметрического способа сравнения и коррекции сейсмических данных.

Степень разработанности темы исследования

Сравнение сейсмических сигналов относится к глобальной проблеме, которой посвящено много математических работ. Разработке общих вопросов теории сигналов и фильтрации посвящены труды: Бриллинджер Д., 1980; Гонсалес Р., Вудс., 2019; Гудмен Дж., 1970; Марпл-мл. С.Л. 1990; Оппенгейм Э., 1980; Папулис А., 1982; Прэтт У., 1982; Харкевич А.А., 1973. Методические вопросы применения спектральных оценок сейсмических сигналов и волновых полей рассмотрены в работах: Гогоненков Г.Н. 1987; Калинин А.В., и др., 1977; Канасевич Э.Р., 1985; Клаербоут Дж.Ф., 1973-1983; Кондратьев О.К., 1986; Силвия М.Т., Робинсон Э.А. 1983.

Существенный вклад в применение спектрального анализа сейсмической записи внесли зарубежные исследователи: Robinson E. A., 1967; White, R.E., Мацуока Т., 1984; Силвия М.Т. 1983. Интерес представляют исследования в смежных науках - Радиозлектронике и Автоматике. Следует отметить работы авторов, выполнивших исследования по обобщению преобразования Гильберта и оценкам

точности измерения фазовых спектров (Бутырский Е.Ю., 2014; Жмудь В.А. и Димитров Л.В, 2017; Терешкин Д.О., Семибаламут В.М., 2018).

В современных работах по сейсморазведке важное место занимают исследования методов возбуждения вибросигналов. Контролируемое изменение параметров, комбинированных сейсмических свип сигналов описано в работах: Жуков А.П, Шехтман Г.А., Шнеерсон М.Б Коротков И.П., 1981-2023.

Важно отметить существенный вклад Российских ученых в применение анализа частотно зависимого поглощения сейсмических волн (Авербух А.Г. 1970-1982; Рапопорт М.Б. 1983; Рыжков В.И. 2003). Также заметный вклад в практическое применение теории фильтрации внесли работы, посвященные деконволюции (Малкин А.Л. Сорин А.Я., Фиников Д.Б. 1986-1989). В данных трудах разработана теория определения фазовых спектров сейсмических сигналов и применения фазовой деконволюции.

Степень разработанности темы можно охарактеризовать как максимальную по сравнению с другими научными направлениями в обработке данных сейсморазведки. Классическими работами заложены основы теории, опубликованы практически все возможные математические методы обработки сигналов и сейсмических волновых полей. Предложены многочисленные практические решения задачи деконволюции сигналов. В нашей работе в качестве практической цели ставится задача сравнения волновых полей и поиска параметрического описания искажений, которые получает сейсмическая волна при возбуждении или приеме сигнала.

Цель исследования – разработка методов параметрического способа сравнения и коррекции искажений сейсмических сигналов, обусловленных различными или неидеальными условиями возбуждения и регистрации волновых полей.

Задачи

1. Установить возможность определения и коррекции искажений формы сейсмического сигнала на синтетических и реальных данных.
2. Определить эффективность внедрения в граф обработки сейсмических данных программ, позволяющих производить параметрическую коррекцию сейсмических сигналов.
3. Выявить особенности применения, устойчивость параметрической коррекции к модельным и реальным данным.

Методология и методы исследования

Методологический подход в представленной работе включал в себя несколько этапов:

1. Создание моделей сейсмических данных. Для выполнения работы потребовались специально созданные модели сейсмических трасс, расчет которых был выполнен в рамках пакета Aspen Echos и кодов программ, написанных на Matlab;

2. Проверка справедливости метода. Тестирование на моделях. Результаты тестирования программ получались в виде текстовых таблиц или изображений, которые подготавливались и обрабатывались для публикации в статьях и настоящей работе;

3. Опробование на сейсмических данных. Сейсмические файлы данных обрабатывались внутри пакета Aspen Echos. Результатами обработки являлись графические файлы, текстовые таблицы, графики. Программные средства, использованные при исследованиях и написании работы: Matlab, Aspen Echos, INSTA-GEO – ООО «Петрорейс».

Защищаемые положения

1. Метод сравнения сейсмических сигналов, основанный на построении полосового фильтра, задаваемого наклоном логарифмического спектра, позволяет определять искажения одного сигнала относительно другого.

2. Метод расчета трехпараметрического полосового фильтра позволяет определять искажения фазового спектра зарегистрированного сигнала относительно сигнала источника.

3. Методика параметрического определения искажений сейсмических сигналов позволяет получать с помощью оптимизационного подхода устойчивые и достоверные оценки различия спектров сравниваемых сигналов.

4. Разработанный технологический граф позволяет уменьшать время выполнения проектов и получать корректные сейсмические изображения для последующей интерпретации.

Научная новизна

- Разработан оригинальный параметрический способ сравнения формы амплитудных спектров сейсмических сигналов, основанный на применении корректирующих адаптивных фильтров (КАФ), реализующих измерение наклонов логарифмических спектров.

- Разработан трехпараметрический метод сравнения фазовых спектров сигнала.

- Для параметрического сравнения сигналов использован метод оптимизации, базирующийся на метрике NRMS. Доказано преимущество этого подхода по сравнению с традиционными метриками оценки сходства сигналов.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается результатами обработки сейсмических данных, полученных в рамках производственных проектов и опубликованных в отчетах и статьях.

Работа выполнена в соответствии с задачами, поставленными в компании ПетроТрейс с целью усовершенствования ПО для обработки сейсмических данных. Разработанные в пакете Aspen Echos исследовательские программы были использованы для обработки сейсмического материала и опробования методики параметрической коррекции искажений. Основные результаты опубликованы в статьях. Представленные в диссертации научные результаты докладывались на научно-практической конференции «ГеоЕвразия 2022» Москва.

Личный вклад

Автор лично занимался моделированием сейсмических данных 2D с целью разработки методики параметрического сравнения и коррекции сигналов, которая включала бы в себя тестирование программ сравнения данных и выбор оптимальной методики и меры сходства при сопоставлении сигналов, с последующим опробованием программ и методики на различных реальных данных. На основании проведенных исследований разработана и опробована методика определения искажений сейсмических сигналов, реализованная с помощью оптимизационного подхода к определению параметров амплитудного и фазового спектров.

Во всех опубликованных работах вклад автора является определяющим. Автор принимал активное участие в постановке научных задач, проведении численных исследований, разработке теоретических моделей, анализе полученных результатов и предоставлении их к печати. При этом необходимо отметить следующее – теоретическое обоснование алгоритмов разных типов деконволюции [публикации 1, 4] проведено совместно с Н.М. Матвеевым, разработка параметрического метода оценки и восстановление амплитудного спектра сейсмического сигнала [2, 5] – совместно с А.А. Шевченко, в соавторстве с ним же предложен метод трехпараметрической коррекции фазового спектра сейсмического сигнала [3]. Автором была проделана значительная работа над текстом статей с последующим представлением их в архив и редакции журналов, осуществлена переписка с редакторами и рецензентами.

Теоритическая и практическая значимость работы

Разработанная методика позволяет корректировать искажения сейсмических сигналов при обработке сейсмических данных,

зарегистрированных в наземной сейсморазведке. Методические разработки и алгоритмы корректирующей адаптивной фильтрации внедрены в производственных проектах обработки сейсмических данных компании ООО «ПетроТрейс». Применение методических разработок позволяет повысить качество и эффективность обработки комплексных проектов, в которых сейсмические данные получены с различными сейсмическими источниками.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы были включены в отчетные материалы по ряду производственных проектов и докладывались на научно-практической конференции «ГеоЕвразия – 2022».

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 5 статьях в рецензируемых научных журналах, рекомендованных для защиты в МГУ. По теме диссертации опубликованы тезисы в сборнике материалов конференции.¹

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка использованных источников из 99 наименований. Общий объем диссертации – 106 страницы, в том числе 55 рисунков.

Благодарности

За помощь на всех этапах подготовки данной работы автор глубоко благодарен своему научному руководителю, д.т.н. профессору Жукову Александру Петровичу.

Диссертант искренне признателен заведующему кафедры сейсмометрии и геоакустики геологического факультета МГУ д.ф.-м.н. профессору Владову Михаилу Львовичу, а также сотрудникам кафедры: д.т.н. профессору Гайнанову В.Г. и к.ф.-м.н. доценту Степанову П.Ю. за мотивирование и поддержку в написании диссертации.

Кроме того, автор выражает благодарность своим коллегам из компании «ПетроТрейс» – Матвееву Н.М., Баранову К.В. и Шевченко А. А. – за совместный плодотворный труд над научными статьями,

¹ **Королев Д.А.**, Королев А.Е., Шевченко А.А. Параметрические методы коррекции сигналов в вибросейсморазведке//Труды V Международной геолого-геофизической конференции «ГеоЕвразия-2022. Геологоразведочные технологии: наука и бизнес» – 2022 – Том III – С.57-60

конструктивное обсуждение возникавших при обработке данных проблем и помощь при поиске решений.

Особые слова благодарности диссертант хотел бы выразить Королёву Евгению Константиновичу. Его поддержка и мудрые советы внесли значительный вклад в создание этой диссертации. Автор искренне благодарен своим родителям за терпение, неоценимую моральную поддержку, вдохновение и веру в успех.

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 к изучению различий между сейсмическими сигналами и в реализации методов коррекции сейсмических записей.

Глава 1. Предпосылки использования параметрических подходов при определении и коррекции искажений сейсмической записи

При современной обработке сейсмических данных невозможно применить современные алгоритмы обработки, если о модели волнового поля и модели среды нет информации, если не измерены скоростные модели и нет информации о структуре полезного сейсмического сигнала и помехах. Поэтому введение параметрических описаний волновых полей лежит в основе большинства алгоритмов обработки данных.

Модель сейсмического сигнала. Квазирегулярные волновые поля

В работе (Нахамкин С.А. 1977) введено понятие квазирегулярного сейсмического поля. Под квазирегулярным сейсмическим волновым полем понимается совокупность сейсмических событий, например, отраженных волн, описываемых набором параметров. Для каждой волны задается годограф и форма сейсмического сигнала. Годограф каждой волны может быть задан одним или несколькими параметрами (функцией времени и скорости), форма сигнала не зависит от пространственной координаты, амплитуда каждой волны может быть постоянной или плавно изменяться вдоль годографа. Переменными параметрами модели квазирегулярного поля являются: время – t , пространственная координата – x , величина, определяющая для каждой отдельной волны закон изменения годографа – ϑ . Если считать, что время и координата меняются дискретно на оцифрованных волновых полях, то $t = s\Delta t$; $\tau_k = s_k \Delta t$, $\vartheta = m\Delta \vartheta$, где величины s , s_k и m принимают целочисленные значения. Можно считать, что шаг

дискретизации времени Δt и другие приращения координат равны 1. Используя дискретное представление волнового поля, получим представление дискретной квазирегулярной модели:

$$u_k(s, \rho) = a^0 \sum_{m=-\infty}^{m=\infty} a_m f_0(s - s_0 - m\beta_k) \quad (1)$$

Данная модель u_k описывает интерференционное поле в дискретном виде, то есть для каждой трассы сейсмограммы k и для каждого отсчета времени s суммируется набор волн. Каждая волна имеет свою постоянную форму сигнала f_0 . В зависимости от номера m амплитуда волны задается весом a_m . Предположим, что в модели сигналы помимо амплитуды могут менять свою форму, тогда в уравнении (1) можно добавить зависимость f от координаты:

$$u_k(s, \rho) = a^0 \sum_{m=-\infty}^{m=\infty} a_m f_{(0,m)}(s - s_0 - m\beta_k) \quad (2)$$

Мы будем предполагать, что амплитудный и фазовый спектр сейсмического сигнала зависят от пространственных переменных, то есть форма сигнала отдельной волны $f_{(0,m)}(s - s_0 - m\beta_k)$ может меняться на сейсмограмме. Измерение параметров сейсмического сигнала (фазы и амплитудного спектра), усложнит модель, но даст возможность применять построенные модели сейсмического сигнала в процедурах обработки (при построение обратных фильтров или корректирующих фильтров подавления, пропускания).

Постановка задачи определения и компенсации искажений сейсмических данных

Искажения сейсмических сигналов чаще всего оцениваются путем сравнения наблюдаемого сигнала с идеальным, определённым геофизиком в соответствии с поставленной задачей. Таким эталоном может быть минимально-фазовой сигнал с равномерным амплитудным спектром. Сравнение для определения искажений может проводиться аналогично подходу, используемому в методе ВСП при оценке параметра поглощения (добротности). При оценке поглощения предполагается сравнение сигналов падающей волны с некоторым базовым сигналом, зарегистрированным чаще всего одним из ближайших к поверхности Земли сейсмоприемником.

Задачи по разработке корректирующих фильтров

1. На основе проведенного анализа можно заключить, что в качестве постановки задачи удобно использовать модель квазирегулярного волнового поля (Нахамкин С.А. 1977), добавив к

модели вместо амплитудных коэффициентов дополнительную возможность изменения формы сигнала.

2. Во многих параметрических методах, рассмотренных в этой главе, подбор параметров осуществляется путем расчета и минимизации функционалов или интегральных параметров, таких как разрешённость (Малкин А.Л., Фиников Д.Б. 1989; Кунченко Д.С. и др. 2022; Полубояринов М.А., Фиников Д.Б. 2006). Таким образом, данный подход может быть применён для подбора параметров в настоящей работе.

3. Анализируя подход к использованию частотно-временного разложения трассы (O.Portniaguine, J.P.Castagna, 2004), можем заметить, что важным вопросом является выбор параметров сигнала или фильтра, которые будут использоваться для подбора модели искажения сигнала.

4. При определении корректирующих фильтров, в работах (Полубояринов М.А., Фиников Д.Б. 2006) используются специальные преобразования, ограничивающие частотный диапазон расчета параметров, что применимо и в нашей работе. Однако в работах (Жуков А.П. и др. 2011; Адиев Т.Р., Коротков И.П. 2023; Королев Д.А., Шевченко А.А. 2024) показывается, что иногда требуется использовать коррекцию сигнала в полосе частот меньшей, чем полный частотный диапазон существования сейсмического сигнала. Так, например, искажения возбуждения сигнала в вибросейморазведке могут затрагивать только узкую полосу высоких частот, оставляя низкочастотную часть спектра без изменения. Следовательно, в работе надо предложить некоторый тип вейвлетов, для которых часть спектра корректирующего фильтра остается постоянной.

Глава 2. Параметрический подход к коррекции формы сейсмического сигнала

Параметрический подход к сравнению амплитудных спектров

Для того чтобы при возбуждении или в процессе обработки контролировать изменения амплитудных спектров сигналов будем использовать специальные компенсирующие фильтры. Пусть эти фильтры строятся аналогично фильтрам, компенсирующим поглощение сейсмического сигнала при заданном параметре добротности Q . Определим частотный диапазон фильтра четырьмя значениями частоты (F_1, F_2, F_3, F_4). В центральной полосе (F_2, F_3) будем рассчитывать АЧХ фильтра исходя из заданного параметра Q , который определяет наклон логарифмического спектра.

$$Q^{-1} = \frac{1}{\pi f(t_2 - t_1)} \ln \left[\frac{A_2(\omega)}{A_1(\omega)} \right] \quad (3)$$

При этом в формуле для расчета добротности зафиксируем параметр времени, установив для всех фильтров $(t_2 - t_1) = 1$. На рисунке 1 приведены логарифмические и обычные спектры, рассчитанные для трех диапазонов частот и трех различных параметров Q . Первый частотный диапазон (0,10,30,40 Гц) параметр $Q=100$; второй частотный диапазон (20,30,60,70 Гц) параметр $Q=-200$; третий частотный диапазон (50,60,100,120 Гц) параметр $Q=300$. Таким образом, мы можем для любого диапазона частот рассчитывать фильтры с различными параметрами Q . Краевые части фильтра сглаживаются с помощью весовой функции Тьюки, с сохранением непрерывности первой производной логарифмического спектра. На рисунке 2 приведены амплитудные спектры и операторы фильтрации для двух взаимно обратных фильтров $Q=50$ и $Q=-50$ в частотном диапазоне (20,30,60,70 Гц). Построенные таким образом операторы фильтра мы предлагаем использовать при сравнении сигналов или подборе искажения сигнала, прошедшего некоторый путь от источника к приемнику.

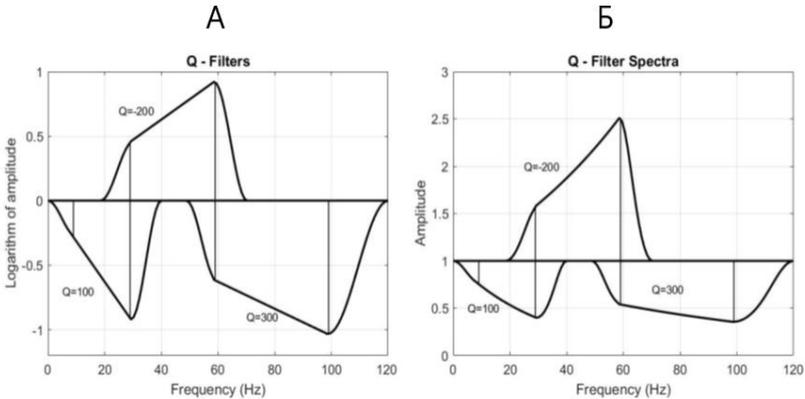


Рис. 1 Задание логарифмического спектра Q -фильтров (А). Спектры Q -фильтров (Б). (Параметры $Q=100, -200, 300$)

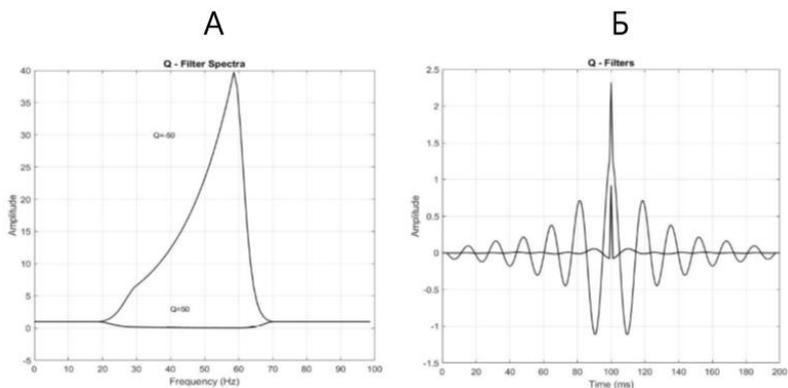


Рис. 2. Спектры Q -фильтров (А). Операторы Q -фильтров (Б). (Параметры $Q=-50$, $Q=+50$)

В целях проверки подхода, который мы предполагаем использовать для алгоритма параметрического подбора фильтров, выполним эксперимент. Зададим полосовой сейсмический сигнал и применим к нему искажения с помощью фильтра с постоянным параметром Q , а затем восстановим сигнал с фильтром, имеющим параметр Q с противоположным знаком. Пусть спектр исходного (неискаженного) сигнала находится в диапазоне частот (0, 15, 80, 160 Гц). На рисунке 3А показан тестовый сейсмический сигнал длительностью 201 мс и его амплитудный спектр. Построим фильтр с параметром $Q=+50$ в ограниченном частотном диапазоне (20,30,60,70) и применим его к исходному полосовому сигналу (рисунк 3Б, верхний фрагмент). Применение фильтра с параметром $Q=-50$ в том же частотном диапазоне показано на нижнем фрагменте рисунка 3Б. Таким образом, мы создали два различно искаженных сейсмических импульса.

Повторное применение восстанавливающих Q фильтров приведено на рисунке 3В. Сравнение сигналов после двух фильтраций с исходным сигналом демонстрирует корректность процедуры построения и применения Q фильтров (Рис.3).

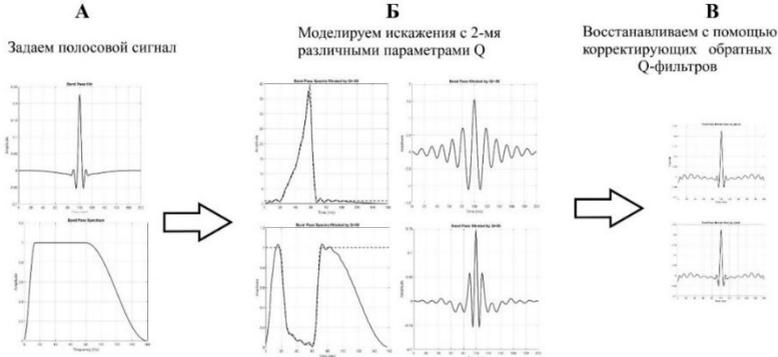


Рис. 3 Сигнал полосового фильтра, используемый как тестовый сигнал источника – (А). Сигналы и спектры после фильтрации фильтрами с параметрами $Q=\pm 50$. Пунктиром нанесены спектры фильтров с параметром $Q=\pm 50$ – (Б). В – Сигналы после восстановления «искажения» обратными фильтрами ($Q=-50$ и $Q=50$).

Параметрические подходы к сравнению и определению фазовых спектров

На практике для определения различия в фазовых спектрах двух сигналов в окне анализа тестируются два параметра: сдвиг сигналов друг относительно друга и угол поворота фазы одного сигнала относительно другого (R.White и др. 2003). Если заданы две сейсмические трассы $f(t)$ и $g(t)$, то для приведения наилучшим образом трассы $g(t)$ к трассе $f(t)$, надо найти фильтр $W(t)$ такой, что свертка трассы $g(t)$ с фильтром $W(t)$ минимизирует среднеквадратическое отклонение от трассы $f(t)$, то есть: $f(t) \approx g(t) * W(t)$

Рассматривая корректирующую фильтрацию сейсмической трассы $g(t)$, мы остановимся на фильтре $W(t)$ с единичным амплитудным спектром и фазовым спектром, равным разностному фазовому спектру:

$$\varphi(\omega) = \varphi_f(\omega) - \varphi_g(\omega) \quad (4)$$

где φ_g и φ_f – фазовые спектры двух сравниваемых трасс. Причем фазовый спектр можно определять только в пересекающемся диапазоне частот. Такой фильтр не изменит амплитудный спектр фильтруемой трассы, а только скомпенсирует разницу фазовых спектров в выбранном диапазоне частот. При небольшом диапазоне частот в спектре сигнала аппроксимацию фазового спектра можно выполнить полиномом второй степени:

$$\varphi(\omega) \approx a_0 + a_1\omega + a_2\omega^2 \quad (5)$$

здесь a_0 – определяет поворот фазы; a_1 – отвечает за взаимный сдвиг двух трасс; a_2 – определяет некоторый фазовый фильтр, смещающий фазы различных частотных составляющих. Трехпараметрическая аппроксимация фазового фильтра (a_0 , a_1 , a_2) будет равноценна выделению медленно меняющихся компонент в фазовом спектре фильтра оператора $W(t)$. На рисунке 4 приведены операторы сдвига сигнала и их спектры, которые выполняют сдвиг сигнала на (-3мсек). Оператор прямого сдвига сигнала, показанный на фрагменте рис.4Б, представляет собой сдвинутый на -3 мс дельта импульс. Его спектр – линейная функция. Два других оператора сдвигают сигнал на -3мс, но при сдвиге происходит изменение формы сигнала. Использование параметрического подхода к расчету коэффициентов разложения фазового спектра в ряд позволяет строить процедуру подбора фазовых спектров сигнала. На рисунке 5 показаны сигналы, сдвинутые на различные времена с помощью применения трех различных типов операторов сдвига. При сравнении форм сдвинутых сигналов можно видеть, что все формы сигнала, кроме простого сдвига, преобразуют форму исходного сигнала за счет различия в фазовых спектрах применяемых операторов.

Для того чтобы определить три коэффициента в разложении фазового спектра, требуется применить оптимизационный способ оценки параметров. Подход, основанный на использовании различных компонент фазового спектра, дает возможность определять один из возможных – эквивалентных, наборов параметров фазового спектра корректирующего фильтра. Неоднозначность расчета коэффициентов фазового спектра обусловлена наличием помех и, возможно, достаточно сложной формой сигнала (фазового спектра сигнала).

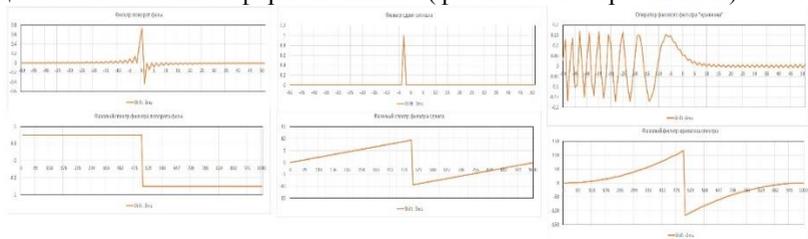


Рис.4 Операторы фильтров сдвига и их спектры, полученные за счет использования различных коэффициентов разложения фазового спектра в ряд.

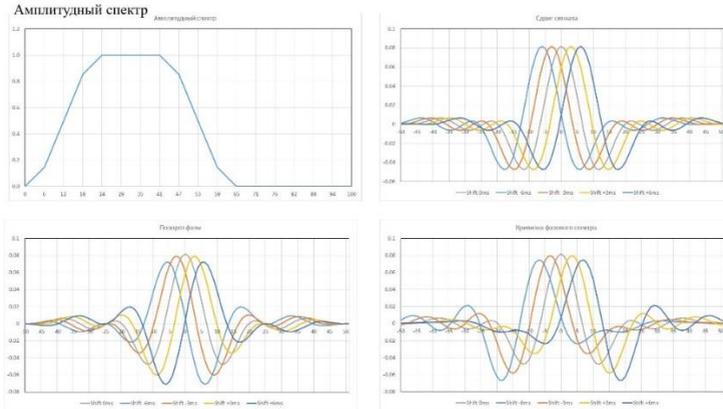


Рис.5 Изменение формы сигналов при вариациях коэффициентов фазового спектра

Глава 3. Разработка методики параметрических оценок искажения сейсмических сигналов

Использование различных мер сходства сейсмических сигналов

При стандартных подходах для двухпараметрической оценки фазового спектра при оценке близости двух сигналов используется коэффициент корреляции. В алгоритмах обработки сейсмических данных используются различные оценки близости трасс, часто для повышения помехоустойчивости анализа используют функционалы с первой степенью сейсмической трассы. Для повышения разрешенности анализа применяют сейсмические трассы, возведенные в степень. Для анализа фазовых спектров будем использовать функционал:

$$R(\tau, \varphi) = \sum_{i=\tau_1}^{\tau_2} |Tr1(i) - Tr2(i) * F(\tau, \varphi, cur)| \quad (6)$$

где R – значение функционала, зависящее от сдвига τ между двумя сейсмическими трассами и фазового поворота φ , и cur – кривизны фазового спектра. Процедуру подбора параметров фазового фильтра $F(\tau, \varphi, cur)$ можно иллюстрировать кубом меры $R(\tau, \varphi, cur)$. На рисунке 6 представлены три сечения куба R взаимно перпендикулярными плоскостями. Минимальное значение оценки находится в центре темно-синей области куба. Минимальное значение меры R – соответствует наилучшей аппроксимации фазового спектра тремя параметрами (τ, φ, cur) или (a_0, a_1, a_2) .

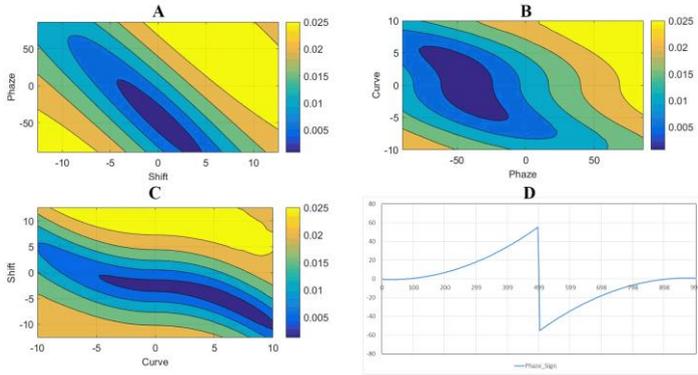


Рис.6 А – карта распределения (фаза, сдвиг). В – карта распределения (фаза, кривизна); С – карта распределения (кривизна, сдвиг) D – парабола, – 3-я компонента фазового спектра

Построенные амплитудные и фазовые операторы фильтра мы предполагаем использовать при оценке различия сейсмических сигналов. Если выбраны для сравнения два сигнала, то для определения корректирующего фильтра, будем фильтровать второй (искаженный) сигнал различными фильтрами и сравнивать результат фильтрации с первым опорным сигналом. Когда первый опорный сигнал совпадает с отфильтрованным вторым сигналом, будем считать, что мы подобрали параметры амплитудного и фазового фильтров, которые компенсируют отличие второго сигнала относительно первого. В качестве меры сходства предлагается нормированный коэффициент корреляции или NRMS (E. Kragh, P. Christie, 2002). Оценка NRMS сравнивает степень сходства между двумя сейсмическими сигналами или трассами и определяется по формуле:

$$NRMS = \frac{200 \times RMS (a_i - b_i)}{RMS (a_i) + RMS (b_i)} \quad (7)$$

$$RMS (x_i) = \sqrt{\frac{\sum_{t_1}^{t_2} (x_i)^2}{N}} \quad (8)$$

NRMS и RMS – определяет энергию сейсмического сигнала во временном окне (t_2-t_1). Таким образом, мерой сравнение NRMS является отношение энергии разностного поля по отношению к полусумме энергий двух сигналов. Применение такого подхода должно давать только выравнивание наклонов амплитудных спектров и квадратичной аппроксимации фазового спектра сигналов в выбранном частотном диапазоне.

Методические рекомендации по оценке параметров амплитудного и фазовых спектров сейсмических сигналов

Примеры построения амплитудных и фазовых фильтров выполнялись в априорно заданном диапазоне спектра. Это позволило выбирать только ту область спектра, где амплитуды сигнала существенно выше помех. При исследовании параметрических методов коррекции были получены методические выводы, которые можно использовать при практическом применении параметрического подхода к корректирующей фильтрации:

1. На первом шаге методики важно применение амплитудного корректирующего фильтра, уравнивающего сейсмические трассы и по возможности расширяющего амплитудный спектр сигнала.

2. Перед использованием многоканальных параметрических оценок возможно использовать остаточную коррекцию сдвигов.

3. Возможность использования сглаживания определяемых параметров корректирующих фильтров.

4. При параметрической коррекции возможно получение средних значений параметров корректирующей фильтрации и расчет среднего фильтра.

5. Набор трех параметров может быть неоднозначным, поэтому можно выполнять два шага фазовой коррекции, определяя и применяя двухпараметрическую коррекцию. Повторная фазовая коррекция может быть выполнена на один параметр кривизны.

Глава 4. Методы параметрического учета и компенсации искажений сигналов при обработке сейсмических данных

Определение поглощения по данным ВСП

Использование параметрической коррекции сигналов интересно проверить на стандартной задаче получения оценок параметра поглощения по амплитудным спектрам ВСП. На рисунке 7Б приведено поле падающей волны, которую будем использовать для анализа, а на фрагменте А – выборочно рассчитанные амплитудные спектры падающих волн. Спектр первой трассы, с которым сравниваются остальные спектры, нарисован коричневым цветом. На фрагменте 7В приведено сравнение спектров первого и 200 приемников. Для расчета и компенсации поглощения был выбран диапазон построения тестовых фильтров 10-80Гц. На рисунке 7Г приведено отношение логарифмических спектров до и после фильтрации.

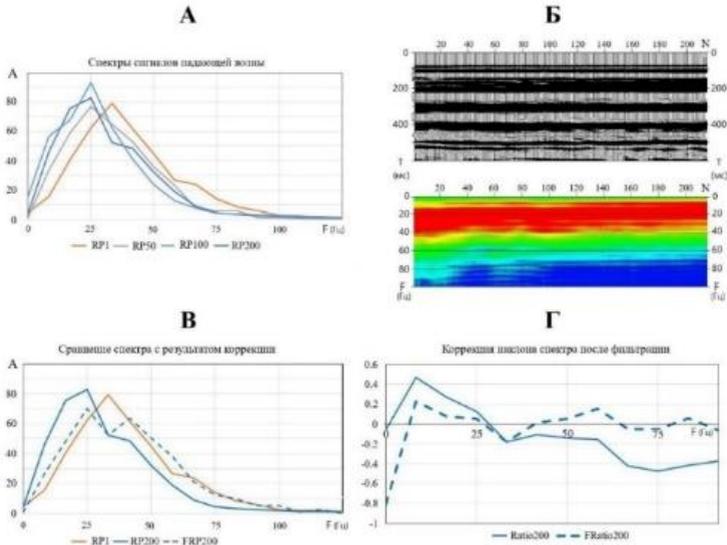


Рис.7 Использование Q -фильтров для подбора параметров поглощения. А – спектры сигнала для четырех глубин расположения приемников; Б – Волновое поле и спектры сигналов падающей волны; В – спектры с базового (RP1) сейсмоприемника, с текущего сейсмоприемника до и после корректирующей Q фильтрации (RP200, FRP200); Г – наклоны спектров текущего сейсмоприемника до и после корректирующей Q фильтрации

Результат коррекции можно считать хорошим. Спектр исходной трассы скорректирован и отношение спектров имеет наклон, близкий к нулю, что показывает равенство спектров первого и скорректированного сигнала в области восстанавливаемых частот (10-80 Гц).

Коррекция искажений сигнала в вибросейсморазведке

Для адаптивной коррекции сигналов в вибросейсморазведке при полевых работах используется методика применения адаптивных свипов, которая предполагает корректировать спектральный состав возбуждаемого сигнала (Korotkov I., Zukov A. 2020; Адиев Т.Р., Коротков И.П. 2023). Мы рассмотрим параметрический подход к описанию возможных искажений сигналов, используемых при обработке данных (Королев Д.А. и др. 2022). Предположим, что для возбуждения сигнала используется линейно-частотно модулированный (ЛЧМ) свип длиной 12 секунд. Изменение частоты ЛЧМ свипа происходит в диапазоне 10-100Гц. При этом начальное и конечное изменение амплитуды свипа происходит за 0.1с. Как правило, при

вибрационном возбуждении происходят искажения свипа, обусловленные неупругим взаимодействием плиты вибратора с грунтом. В результате влияния механической системы плита-грунт, в среде будет распространяться свип – сигнал, отличающийся от заданного опорного сигнала.

Предположим, что искажения можно смоделировать некоторым параметрическим Q-фильтром, описанным ранее с параметром $Q=150$ и заданным в диапазоне частот (30,40,80,100 Гц). Рассмотрим, как изменится функция автокорреляции, спектр и форма свипа после применения корректирующего (искажающего) фильтра. На рисунке 8А приведены три корреляционных функции. Красным цветом показана автокорреляционная функция (ФАК) ЛЧМ свипа. Это импульс Клаудера опорного свипа, он высокочастотный и имеет четко выраженный центральный максимум. Это идеальный сигнал источника, который был бы получен на коррелограмме, если бы не было никаких искажений опорного ЛЧМ свипа. Черным на графике показан импульс Клаудера или ФАК свипа с искажениями. Такая форма сигнала была бы на коррелограмме, если бы мы знали искаженный свип и рассчитали бы с ним коррелограммы наблюдаемого поля. Синим цветом на графике дана взаимно корреляционная функция (ФВК) базового свипа с «искаженным» свипом. Это та форма сигнала, которая наблюдается на коррелограммах, когда опорный свип коррелируется с результатом распространения свипа с искажениями. Форма сигнала в виде ФВК симметричная, но существенно более сложная, чем обе ФАК на рис.8А. На рисунке 8Б показаны амплитудные спектры базового свипа (красный график) и амплитудный спектр свипа с искажениями (черный график).

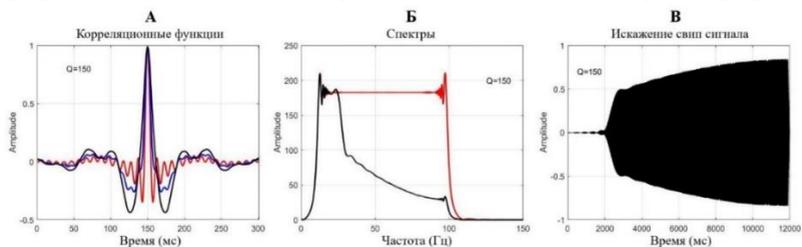


Рис.8 Корреляционные функции, спектры и разности опорного свипа и фильтрованного фильтром $Q=150$. Корреляционные функции (красная) – опорный свип; (черная) – фильтрованный свип; (голубая) – взаимная корреляция опорного и фильтрованного свипов.

Сравнение показывает существенную разность спектров в диапазоне 50-100 Гц и совпадение спектров на низких частотах (до

40Гц). На фрагменте рис.8В показана разность свип сигналов во временном масштабе. Разность свипов на низких частотах (10-40Гц) и, соответственно, на временах меньше 2с отсутствует или близка к нулю. Далее с увеличением времени разность двух свипов возрастает, что согласуется с различием спектров свипов на высоких частотах. Представленные различия спектров и сигналов показывают, насколько важно минимизировать искажения свипов при возбуждении или, по крайней мере, иметь информацию с контрольных сейсмоприемников, регистрирующих свип сигналы, которые реально распространяются в геологической среде.

Коррекция данных с целью повышения разрешенности записей

Примеры параметрической коррекции и расширения спектров сейсмических данных приводятся на двух практических примерах. На фрагменте рис.9А приведено волновое поле, зарегистрированное при вибросейсмическом возбуждении и корреляции с ЛЧМ свипом. На фрагменте рис.9Б представлена коррелограмма, полученная с использованием компенсации высокочастотных компонент спектра. Используются полосовые фильтры Q в диапазоне частот 10-80 Гц и параметром добротности $Q=40$. Спектры сигналов, приведенные под каждой сейсмограммой, демонстрируют эффект повышения энергии в области высоких частот после примененной фильтрации. Для фрагмента Б на рисунке спектра приведено сравнение старого и нового спектров сигнала. Можно видеть, что при применении восстанавливающего фильтра увеличиваются амплитуды спектральных компонент на высоких частотах, но сохраняются все локальные особенности спектра. Такая нормализация спектра не вызывает появления артефактов в виде дополнительных осей синфазности на сейсмической записи, но повышает видимую частотность волнового поля.

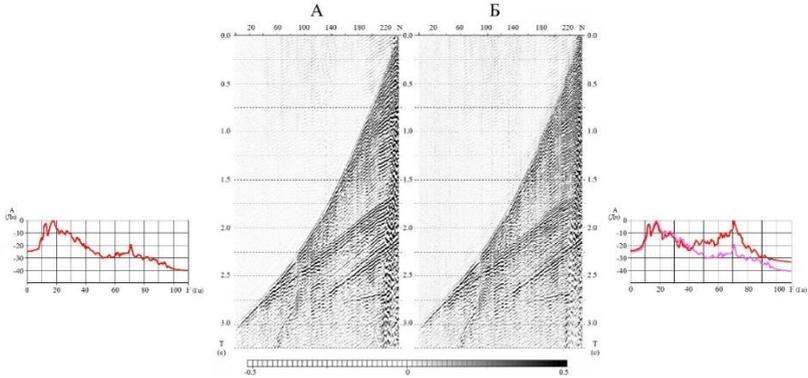


Рис.9 Сейсмограммы и амплитудные спектры. А – до коррекции; Б – после коррекции.

Пример применения корректирующей Q фильтрации, к временному разрезу, представлен на рисунке 10. На фрагменте рисунка Б демонстрируется временной разрез после корректирующей Q фильтрации в диапазоне частот 40-90 Гц и параметре $Q=60$. На сопоставлении старого и нового спектров сигнала на фрагменте Б видно существенное повышение компонент спектра до 80 Гц.

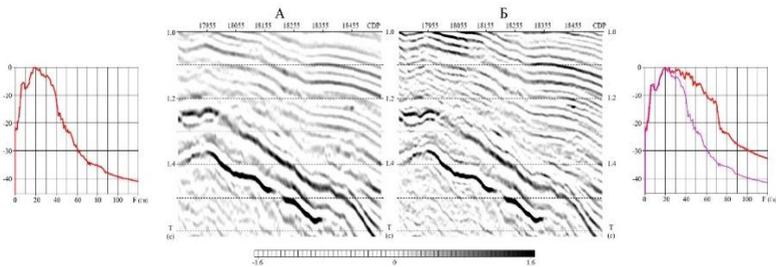


Рис.10 Временные разрезы и амплитудные спектры. А – до коррекции; Б – после коррекции Q-фильтрами.

Корректирующая фильтрация данных ВСП

На Рис.11 приведены волновые поля ВСП, полученные с использованием различных сигналов источника. На фрагменте А приведено поле ВСП, полученное с импульсным источником возбуждения. На трех фрагментах Б,В,Г рисунка 11. показаны разрезы ВСП, для которых в качестве источника сигнала использовались вибраторы, генерирующие различные свип сигналы длиной 15 сек с изменением частоты от 3 до 120 Гц.

На фрагменте Б рис.11. поле ВСП получено при возбуждении линейного свип сигнала, в спектре которого генерировались минимально возможные начальные частоты (LowF). На фрагменте рис.11.В волновое поле ВСП получено при возбуждении сигнала, для которого амплитудная модуляция выполнялась по линейному закону в области логарифмического спектра (Q50). На фрагменте рис.11.Г волновое поле ВСП получено с модуляцией свипа с существенным увеличением амплитуды высокочастотных гармоник (IW1).

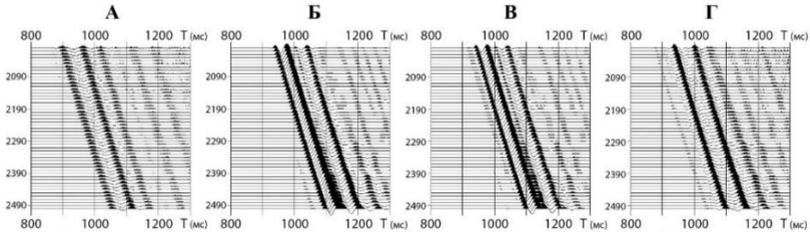


Рис.11 Наблюдаемые поля ВСП. А – импульсный источник; Б – ЛЧМ; В – Q50; Г – IW1

На рис.12 показаны корреляционные функции трех тестируемых свипов и на рис.3 их спектры, рассчитанные для трасс, расположенных на глубине 2290 метров. Спектры представлены в линейном и логарифмическом масштабе для того, чтобы можно было лучше контролировать различие спектров на всех частотах. Сопоставляя формы АКФ и спектры, мы видим, что для сигналов IW1 и Q50 главные максимумы закономерно имеют меньшую длину. Хотя за счет низкой энергии в области низких частот огибающие ФАК слабо затухают, что не приветствуется при наблюдениях ВСП. Однозначно, что с точки зрения временной разрешенности сигнала наилучшая форма ФАК достигается для LowF – свипа. Свип с равномерной АЧХ (LowF) может служить некоторым базовым эталоном, показывающим возможность получения наиболее качественного сигнала с наибольшей разрешенностью в заданном диапазоне частот (3-120Гц). На рис.13 приведены спектры трех различных трасс. Видно, что различие частотного состава сигналов наблюдается в основном в области высоких частот.

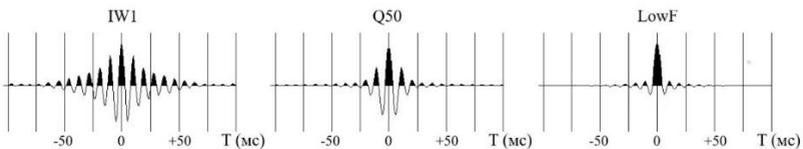


Рис.12 Корреляционные функции свип сигналов

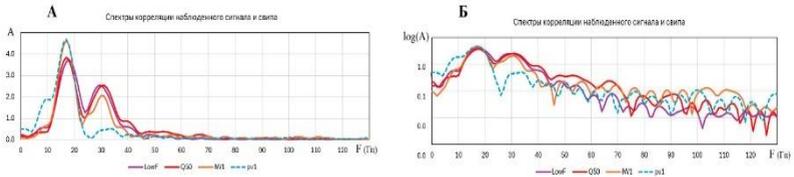


Рис.13 Спектры автокорреляционных функций сейсмической трассы ВСП для различных свипов. Окно анализа 500 мс. В линейном (А) и логарифмическом масштабах (Б).

Для компенсации искажений в области высоких частот используем Q фильтры в диапазоне 40-90 Гц. На рисунке 14 приведены спектры фильтров, которые подобраны для компенсации полей ВСП. Самая большая компенсация потребовалась для восстановления высокочастотных компонент для ЛЧМ свипа с постоянными амплитудами (LowF). Приведенный на рисунке спектр соответствует фильтру в полосе частот 35-40-90-100 Гц, значение параметра $Q=80$. Для волновых полей ВСП применены фильтры в том же диапазоне частот, параметры $Q=90$ и $Q=100$, соответственно, для фильтров Q50 и IW1.

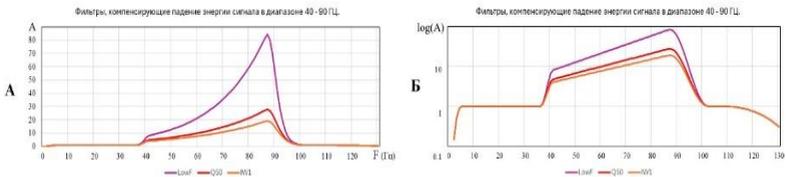


Рис.14 Спектры корректирующих Q-фильтров, используемых для коррекции вибросейсмических записей. А – линейный масштаб; Б – логарифмический масштаб.

По спектрам трасс после применения коррекции можно видеть, что восстановление высокочастотных составляющих спектров сигнала с помощью полосовых Q фильтров выполнено достаточно хорошо. На спектрах в логарифмическом масштабе (рис.15Б) хорошо видно, что уровень усиления для различных вибросигналов после коррекции близок к постоянной составляющей. По сравнению со спектром LowF до коррекции (пунктирная сиреневая линия) видно существенное усиление спектров на частотах выше 40 Гц.

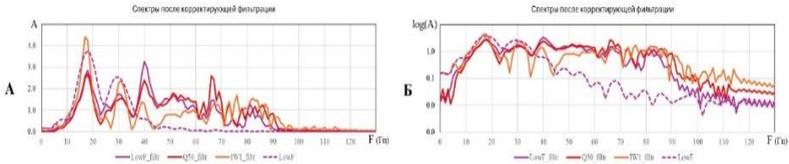


Рис.15 Спектры трассы ВСП ($H=2290m$) после применения корректирующих фильтров. А – линейный масштаб; Б – Логарифмический масштаб. Сиреневый график пунктирная линия – Спектр LowF свипа до применения корректирующего фильтра.

Результаты сравнения волновых полей (рисунок 16) до и после коррекции подтверждают рассмотренные спектральные изменения. На фрагментах А и Б выполненная Q-фильтрами коррекция привела к очень хорошему совпадению восстановленных полей. Несмотря на то, что данные со свипом Q50 до коррекции были более высокочастотными, после коррекции данные LowF и Q50 почти не отличаются друг от друга. Применяемые для коррекции фильтры затрагивали спектральный диапазон 40-90 Гц. Низкочастотная область спектра для двух волновых полей была похожей, что позволило не выполнять коррекцию низких частот.

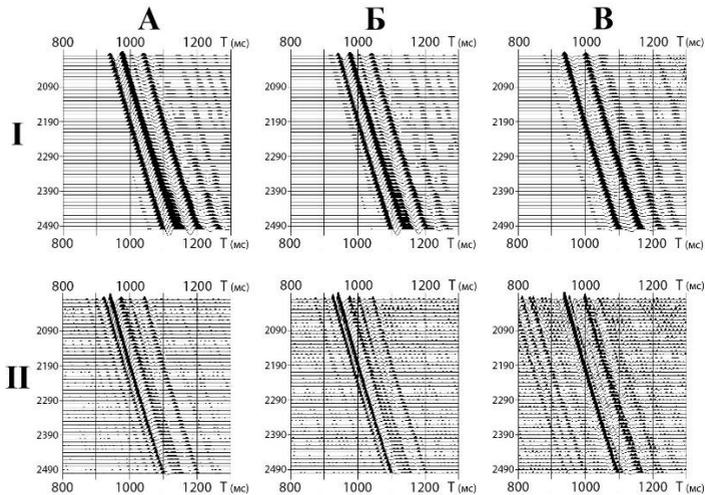


Рис.16.Поля ВСП до (I) и после (II) применения корректирующей Q фильтрации в диапазоне 40-90Гц. А – ЛЧМ сигнал LowF; Б – сигнал с линейным возрастанием амплитуды – Q50; В – сигнал с повышенными амплитудами в области высоких частот – IW1

Заключение

Основные результаты и выводы проведенных исследований по теме диссертации заключаются в следующем:

Разработана и опробована методика определения искажений сейсмических сигналов, реализованная с помощью оптимизационного подхода к определению параметров амплитудного и фазового спектров (**защищаемое положение №3**).

Предложен метод определения искажений сейсмических сигналов на основе применения полосовых параметрических фильтров с одним неизвестным параметром Q , характеризующим наклон логарифмического спектра (**защищаемое положение №1**). Предложен метод трехпараметрической коррекции фазового спектра сейсмического сигнала, основанный на использовании трёх коэффициентов разложения фазового спектра в ряд (**защищаемое положение №2**).

Практическая значимость работы подтверждена применением разработанных методов анализа и восстановления сигналов в практических производственных проектах компании ООО «ПетроТрейс» (**защищаемое положение №4**).

Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы:

Параметрические методы коррекции сигналов представляют большой интерес для разработки подходов к пространственной параметризации искажений и помех. Важным направлением является совершенствование и расширение набора признаков, используемых при моделировании сейсмических искажений. Не менее значимым остается развитие методов сопоставления сигналов, в том числе с применением биспектрального анализа, который позволяет выявлять нелинейные взаимодействия гармоник и фазовые соотношения в сигналах, повышая тем самым точность коррекции.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

1. Матвеев Н.М., Степанов П.Ю., **Королев Д.А.** Применение гомоморфной деконволюции при обработке сейсмических съемок с различными источниками // Геофизика – 2024. – №1. – С. 15-23. – DOI: 10.34926/geo.2024.54.94.002. (1,04 п.л, вклад автора 40%, ИФ РИНЦ – 0,403).

2. **Королев Д.А.**, Королев А.Е., Шевченко А.А. Параметрический метод оценки и восстановления сигналов в сейсморазведке // Геофизика – 2024. – № 4. – С. 20-24. – DOI: 10.34926/geo.2024.60.97.002. (0,58 п.л, вклад автора 60%, ИФ РИНЦ – 0,403).

3. **Королев Д.А.**, Королев А.Е., Шевченко А.А. Параметрическая коррекция фазовых спектров сейсмических сигналов // Геофизика – 2024. – № 6. – С. 46-53. – DOI 10.34926/geo.2024.44.75.006. (0,46 п.л, вклад автора 60%, ИФ РИНЦ – 0,403).

4. **Королев Д.А.**, Матвеев Н.М., Королев Е.К., Шевченко А.А. Исследование робастного подхода к поверхностно-согласованной деконволюции // Геофизика. – 2023. – № 3. – С. 37-44. – DOI: 10.34926/geo.2023.83.39.005. (0,92 п.л, вклад автора 60%, ИФ РИНЦ – 0,403).

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. **Королев Д.А.**, Шевченко А.А. Сравнение волновых полей ВСП, полученных с использованием различных свип сигналов // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2024. – № 3 (82). – С. 37-45. (1,21 п.л, вклад автора 60%, ИФ РИНЦ – 0,044).