

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М. В. ЛОМОНОСОВА  
ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

*На правах рукописи*

**Королев Дмитрий Александрович**

**ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И  
КОМПЕНСАЦИИ ИСКАЖЕНИЙ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ**

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

1.6.9. Геофизика (технические науки)

Научный руководитель:  
доктор технических наук  
Жуков Александр Петрович

Москва – 2025

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	4
<b>ГЛАВА 1. ПРЕДПОСЫЛКИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ И КОРРЕКЦИИ ИСКАЖЕНИЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЗАПИСИ</b> .....	12
1.1. Модель сейсмического сигнала. Квазирегулярные волновые поля .....	12
1.2. Параметрические решения в алгоритмах деконволюции .....	16
1.3. Алгоритмы параметрической оценки фазового спектра сейсмического сигнала.....	18
1.4. Использование частотно-временного разложения трассы .....	21
1.5. Поглощение энергии сейсмического сигнала и параметр добротности .....	25
1.6. Расширения спектра сейсмической записи на основе нелинейной фильтрации.....	28
1.7. Постановка задачи определения и компенсации искажений сейсмических данных .....	31
<b>ГЛАВА 2. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ ПОДХОД К КОРРЕКЦИИ ФОРМЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО СИГНАЛА</b> .....	34
2.1. Параметрический подход к сравнению амплитудных спектров.....	34
2.2. Параметрические подходы к определению и сравнению фазовых спектров ..	42
2.3. Нахождение фазового фильтра, зависящего от трех параметров. ....	46
2.4. Неоднозначность определения компонент фазового спектра .....	51
<b>ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫБОРА ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ОЦЕНОК ИСКАЖЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ</b> .....	56
3.1. Использование различных мер сходства сейсмических сигналов.....	56
3.2. Методические рекомендации по оценке параметров амплитудного и фазовых спектров сейсмических сигналов .....	64

<b>ГЛАВА 4. МЕТОДЫ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО УЧЕТА И КОМПЕНСАЦИИ ИСКАЖЕНИЙ СИГНАЛОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ .....</b>	<b>66</b>
4.1. Поиск корректирующего фильтра, приводящего форму сигнала источника на данных 2D к сигналу, полученному при работах 3D .....	66
4.2. Определение поглощения по данным ВСП.....	71
4.3.Коррекция искажений сигнала в вибросейморазведке .....	77
4.4. Коррекция данных с целью повышения разрешенности записей.....	79
4.5. Корректирующая фильтрация данных ВСП .....	80
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>96</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>98</b>

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **Актуальность темы**

Современная обработка сейсмических данных представляет собой сложный технологический процесс, в котором сформировались устойчивые подходы и методы применения современных компьютерных программ. Ключевые этапы, такие как коррекция статических и кинематических поправок, миграция, деконволюция, построение скоростной модели, не могут быть исключены или заменены в ходе обработки данных. Необходимость и актуальность деконволюции в графе обработки определяется тем, что при регистрации полевых сейсмических данных невозможно избежать ограничений систем сбора данных и искажений волновых полей, обусловленных различными условиями распространения упругих волн в ВЧР. 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 с точки зрения возможностей увеличения разрешающей способности и компенсации искажения сейсмических сигналов. Тем не менее, остаётся важный вопрос корректности применения этих 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.

Внедрение в практику параметрического подхода и спектрального анализа волновых полей было реализовано в методе Регулированного Направленного Приема (РНП). Главной особенностью и преимуществом РНП являлось изучение характеристик волновых полей в зависимости от угла прихода сейсмической волны (Рапопорт М.Б. 1993; Напалков Ю.В. Рябинкин Л.А. 1974). Развитию параметрических подходов к спектральному анализу и параметрическому описанию волновых полей посвящена работа Нахамкина С.А. (Нахамкин С.А. 1977). В данной работе введено понятие квазирегулярного волнового поля, что означает представление волнового поля в виде множества сейсмических событий, каждое из которых определено с помощью набора параметров. В работах Нахамкина С.А. (1977) и Трояна В.Н. (1982) представлена теория разделения интерференционных полей.

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 – Радиоэлектронике 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: Жукова А.П, Шехтмана Г.А., Шнеерсона М.Б Короткова И.П. (1981–2023). Применение параметрического задания частотных и амплитудных параметров свипов равносильно частотной фильтрации сигналов, осуществляемой при возбуждении сейсмических волн.

Важно отметить существенный вклад Российских ученых в применение анализа частотно зависимого поглощения сейсмических волн, таких как 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. В работах, опубликованных в последнее годы, методы оценки формы сейсмического сигнала и теории деконволюции развиваются в различных направлениях. Усовершенствование методов деконволюции рассмотрено в работах Финикова Д.Б. и др. (1997–2023); Денисова М.С. и др. (1997–2023). Применение вейвлет преобразования в программах инверсии представлено в работах Мушина И. А. и др. (1990); J.P.Castagna и др. (2003–2008).

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 большинстве работ целью является обработка волнового поля для оптимальной фильтрации, преобразующей обрабатываемое поле на основе условий, определенных

поставленной практической задачей. 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. Формулировка задачи. На основании комплексного анализа проектов работ в компании ООО «ПетроТрейс» было принято решение об актуальности выполнения работы по изучению искажений сейсмических сигналов. При анализе программ в коммерческом пакете Aspen Echos, были выбраны программы деконволюции и программы, нацеленные на параметрический анализ спектров сейсмических сигналов;
2. 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;

3. 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;

4. Опробование на сейсмических данных. Сейсмические файлы данных обрабатывались внутри пакета Aspen Echos. Результатами обработки являлись графические файлы, текстовые таблицы, графики;

5. Рекомендации к применению в производственных проектах. Рекомендации были получены в ходе анализа результатов обработки и опубликованы в статьях, обсуждены на конференциях и внутренних митингах компании ООО «ПетроТрейс».

Программные средства, использованные при исследованиях и написании работы:

- Создание тестовых файлов с параметрами моделей и необходимых исполняемых программ – Офисный редактор таблиц Excell и редактор Notepad++;
- Написание текста работы – Microsoft Word;
- Подготовка графических рисунков к публикации – Adobe Photoshop и Microsoft Paint 3D;
- Создание сейсмических модельных трасс, обработка сейсмических данных – 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**

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

2. Разработан трехпараметрический метод сравнения фазовых спектров сигнала.

3. 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, полученными в рамках производственных проектов и опубликованными 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 и докладывались на научно-практической конференции «ГеоЕвразия 2022» Москва.

### **Теоретическая 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.

### **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 28, 45] проведено совместно с Н.М. Матвеевым, разработка параметрического метода оценки и восстановление амплитудного спектра сейсмического сигнала [30, 31] – совместно с А.А. Шевченко, в соавторстве с ним же предложен метод трехпараметрической коррекции фазового спектра сейсмического сигнала [29]. Автором была проделана значительная работа над текстом статей с последующим представлением их в архив и редакции журналов, осуществлена переписка с редакторами и рецензентами.

### **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. и Баранову К.В. – за совместный плодотворный труд над научными статьями и конструктивное обсуждение возникавших при обработке данных проблем, за помощь в поиске решений.

Отдельно соискатель выражает глубокую признательность к.т.н Шевченко Алексею Александровичу, руководителю отдела научно-технических разработок и ПО компании «ПетроТрейс», без помощи и поддержки которого диссертационная работа, возможно, не была бы завершена.

Особые слова благодарности диссертант хотел бы выразить Королёву Евгению Константиновичу, посвятившему геофизике всю свою жизнь. Его глубокие знания и опыт оказали неоценимую помощь, начиная с учебы в университете, когда разъяснялись и обсуждались сложные вопросы обработки данных, собирался материал для написания дипломной работы. Его поддержка и мудрые советы внесли значительный вклад и в создание этой диссертации.

Автор искренне благодарен своим родителям за терпение, неоценимую моральную поддержку, вдохновение и веру в успех.

## **ГЛАВА 1. ПРЕДПОСЫЛКИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ И КОРРЕКЦИИ ИСКАЖЕНИЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЗАПИСИ**

Обычно считается, что обработку сейсмических данных можно разделить на две задачи: сейсмовидение и измерение. Первая задача – сейсмовидение, решает вопрос построения изображений, по которым на этапе интерпретации строятся геологические модели. Вторая задача обработки сейсмических данных – это измерение параметров геологической модели, то есть скоростей, положения горизонтов, расчет различных сейсмических атрибутов. Введение понятия модели сейсмического поля объединяет эти две задачи. При современной обработке сейсмических данных невозможно применить современные алгоритмы, если о модели среды нет информации, если не построены 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. Воспользуемся параметрическим описанием волновых полей, введенным в работе, посвященной интерференционным преобразованиям (С.А.Нахамкин 1977).

### **1.1. Модель сейсмического сигнала. Квазирегулярные волновые 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  $f_0$  не зависит от пространственной координаты, амплитуда каждой волны  $a(\vartheta)$  может быть постоянной или плавно изменяться вдоль годографа:

$$u_k(t, \rho) = a^0 \int_{-\infty}^{\infty} a(\vartheta) f_0(t - \tau - \vartheta \beta_k) d\vartheta \quad (1)$$

Уравнение (1) задает сейсмограмму волнового поля  $u_k(t, \rho)$ , где  $k$  – индекс трассы сейсмограммы,  $t$  – время наблюдения, годограф определяется значением нулевого времени прихода волны  $\tau$ , параметрами,  $\beta_k$  и  $\vartheta$  задающими изменения времени и масштабный коэффициент изменения координаты. Через вектор обозначены параметры модели, которые подлежат оцениванию в задаче выделения волны на фоне шумов или других волн. Функция  $t_k = \tau + \vartheta \beta_k$  задает годограф элементарной волны, зависящий от позиции сейсмоприемника ( $k$ ). Вид функции может быть различным.

Случай, показанный на рисунке 1.1а, задается значениями  $\beta_k = k - p$ , и  $\vartheta = \gamma \Delta x$  где  $\gamma$  – обратное значение кажущейся скорости плоской волны. Здесь  $p$  – константа,  $\tau$  – определяет время прихода волны в точку  $p$ .

Случай  $\beta_k = |k - p|$  показанный на рисунке 1.1.б представляет волновой пакет в виде односторонних вееров кусочно-плоских волн.

Семейства различных годографов показаны на рисунке 1.1.в. для случая  $\beta_k = (k - p)^2$ . Годограф и параметр  $\vartheta$  задаются формулами:

$$t_k = \frac{1}{v} \sqrt{(k - p)^2 \Delta x^2 + z_0^2} \quad (1.1)$$

$$\vartheta = \frac{\Delta x}{2vz_0} \quad (1.2)$$

$$\tau = \frac{z_0}{v} \quad (1.3)$$

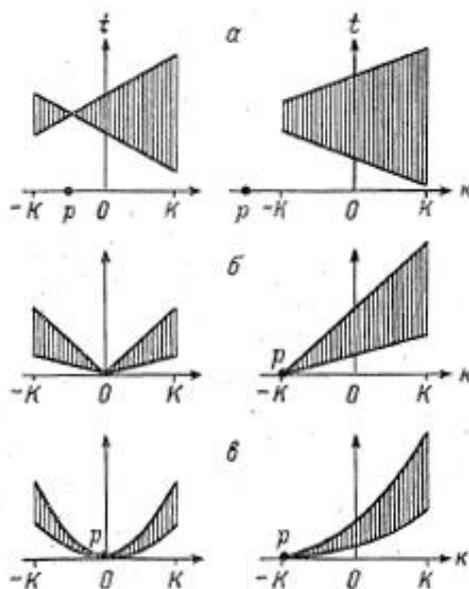


Рисунок 1.1. Кинематические структуры интерференционных волн.

(Нахамкин С.А. 1977). а –  $\beta_k = k - p$ ; б –  $\beta_k = |k - p|$ ; в –  $\beta_k = (k - p)^2$

Для квазирегулярного сейсмического поля для каждой волны задается годограф и функция изменения амплитуды сейсмического сигнала, зависящая от координаты волнового поля. 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  $\Delta t$  и другие приращения координат равны 1. Используя дискретное представление волнового поля, вместо (1), получим:

$$u_k(s, \rho) = a^0 \sum_{m=-\infty}^{m=\infty} a_m f_0(s - s_0 - m\beta_k) \quad (2)$$

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  $a_m$ . На рисунке 1.2 приведены модельные волновые поля, рассчитанные для интерференции элементарных волн одного типа годографов.

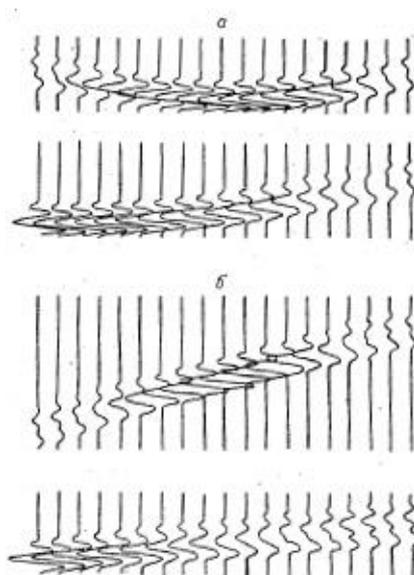


Рисунок 1.2. Интерференционные волны, сформированные наложением параболических (а) и плоских (б) волн. (Нахамкин С.А. 1977).

Использование параметрического подхода широко используется в различных алгоритмах обработки сейсмических данных. Самый популярный метод определения скорости ОГТ путем интерпретации скоростных спектров основан на гиперболической модели годографа. В той или иной форме на параметрических подходах строятся программы пространственной фильтрации волновых полей. Есть принципиальная возможность усложнить квазирегулярную модель. Предположим, что в модели сигналы помимо амплитуды могут менять свою форму, тогда в уравнении (2) можно добавить зависимость  $f$  от координаты:

$$u_k(s, \rho) = a^0 \sum_{m=-\infty}^{m=\infty} a_m f_{(0,m)}(s - s_0 - m\beta_k) \quad (3)$$

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).

## 1.2. Параметрические решения в алгоритмах деконволюции

В рамках одной работы очень сложно охватить все возможные подходы к деконволюции сейсмических записей. Общие подходы к деконволюции и спектральному анализу описаны в книге Марпл-мл. С.Л. (1990). Классические методы спектрального оценивания данных – это одни из самых устойчивых методов анализа данных, они, как правило, сводятся к оценке спектров сигналов и получаются на основе применения быстрого преобразования Фурье. При определении параметрических методов анализа данных предполагается выполнение обязательного шага выбора модели временного ряда, которая будет использована для анализа входных данных. После выбора модели и оценки параметров модели по входным данным выполняется расчет спектральной плотности входных данных. Применение параметрического подхода к анализу сейсмических данных представлено в работе Альтшулера С.В. и др. (1986), где рассматриваются оценки спектров, выполненные на основании моделей авторегрессии (АР) и авторегрессии скользящего среднего (АРСС). Параметры модели, которые требуется получить из входных данных – это последовательность коэффициентов отражения и времен вступления отраженных волн. Для практического решения задачи предусматривается, что на параметры модели накладываются ограничения. Одно из ограничений – статистическая независимость коэффициентов и времен отражения. Многие программы деконволюции сейсмических данных используют параметрические методы анализа данных.

Одним из ограничений при построении оператора деконволюции является предположение о том, что последовательность коэффициентов отражения можно считать случайной статистической последовательностью, хотя на практике распространение волн происходит в конкретной слоистой геологической среде, и с этой точки зрения процесс имеет детерминированную природу (Robinson E.A. 1967, 1984; Силвия М.Т., Робинсон Э.А. 1983). Отличие в подходах к реализации деконволюции связаны с использованием различных моделей процесса

распространения волн, используемых для построения алгоритмов решения задачи. При некоторых подходах к деконволюции в модель процесса могут быть включены управляющие параметры, определение которых уменьшает ошибку метода. Например, для предсказывающей деконволюции используется модель процесса, которая, с одной стороны, основывается на положении о случайности коэффициентов отражения, а, с другой стороны, предполагает детерминистский подход к описанию последовательности реверберационных импульсов. При расчете оператора деконволюции задание оптимального значения интервала предсказания может уменьшать ошибку подавления кратных волн или волн спутников.

Оценка фазового спектра сейсмического сигнала в некоторых случаях может быть использована для коррекции сейсмической записи с целью последующего применения деконволюции к данным с минимально-фазовым спектром сигнала. В работе Малкина А.Л., Финикова Д.Б. (1989) предлагается метод анализа фазового спектра сейсмического сигнала, при котором определение фазового спектра сигнала основывается на оценке точности аппроксимации сейсмического сигнала с точки зрения различия аппроксимированного сигнала и желаемого сигнала по разнице энергий. В данном подходе выполняется подбор коэффициентов в разложении фазового спектра по набору гармоник. Подходы, использующие подбор различных параметров сейсмического сигнала, встречаются во многих работах. В статье Кунченко Д.С. и др. (2022) приводится пример восстановления искажений сейсмического сигнала с использованием подбора коэффициентов компенсирующего фильтра. Под искажениями в работе понимается отличие сигнала от «идеально-правильной формы». Считается идеальным минимально-фазовый сигнал с равномерным амплитудным спектром.

В работе (Полубояринова М.А., Финикова Д.Б. (2006) рассмотрена попытка учета изменения во времени сейсмической записи, обусловленной геометрическим расхождением, частотно зависимым затуханием или наличием в исходных данных когерентных помех. Перед оценкой коэффициентов компенсационного фильтра предлагается выполнить полосовое преобразование, ограничивающее частотный

спектр входных данных только тем диапазоном частот, в котором зарегистрирован сейсмический сигнал. Оптимизационные подходы к определению различных параметров входных сейсмических данных составляют большой класс методов, в которых могут различаться как параметры используемой модели, так и алгоритмы подбора параметров модели (Денисов М.С. и др. 1999; Денисов М.С., Фиников Д.Б. 1999; Фиников Д.Б. 2007; Mitra S., Sacchi M.D. 2007). Так как входные сейсмические данные очень различны, то выбор оптимального подхода обработки остается субъективным и требующим интерпретационного сопровождения (решения специалиста геолога – интерпретатора).

### 1.3 Алгоритмы параметрической оценки фазового спектра сейсмического сигнала

Во многих публикациях (Малкин А.Л., Фиников Д.Б., 1986; Мацуока Т., Ульрих Т.Дж., 1984) предложены методы определения фазового спектра сейсмического сигнала. Рассмотрим подход, основанный на параметризации фазового спектра и подборе параметров с применением оптимизации. В статьях Малкина А.Л., Финикова Д.Б. (1988); Полубояринова М.А., Финикова Д.Б. (2006) используется идея параметрической аппроксимации с небольшим количеством определяемых коэффициентов. Использование программы оптимизации позволяет подобрать коэффициенты разложения, гарантирующие наилучшую оценку фазового спектра. В основе подхода лежит факт, что минимально фазовый сигнал является наиболее коротким по сравнению с остальными смешанно фазовыми сигналами с одинаковыми амплитудными спектрами. Предлагаемая авторами оценка разрешенности сейсмического сигнала  $s(t)$  определяется через функцию  $G(t)$  (Малкин А.Л., Фиников Д.Б., 1986):

$$G(\tau) = s^2(\tau) * s^2(-\tau) \quad (4)$$

и равна:

$$R_G = \frac{0.9G^2(0)}{\sum_t G^2(t)} \quad (5)$$

Использование предложенной оценки разрешенности при подборе коэффициентов разложения фазового спектра сейсмического сигнала дает возможность определить наилучшую оценку фазового спектра.

В работе Малкина А.Л., Финикова Д.Б. (1989) рассмотрена задача аппроксимации фазового спектра  $\Phi(\omega)$  сейсмического действительного дискретного сигнала функцией  $\tilde{\Phi}(\omega, \lambda)$ , зависящей от вектора параметров  $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$ . Коэффициенты  $\lambda_k$  представляют собой отсчеты кепстра сигнала, имеющего единичный амплитудный спектр. Усечение ряда  $\lambda_k$  соответствует умножению кепстра на прямоугольную функцию. На рисунке 1.3 приводится пример аппроксимации двух сигналов. Сигнал (а) имеет существенно более сложную форму, чем сигнал (б). На фрагменте IV приведено сравнение нульфазовых аналогов выбранных сигналов. Сплошной линией представлены сигналы, у которых фазовый спектр есть функция  $\tilde{\Phi}(\omega, \lambda)$ . Прерывистой линией нульфазовые аналоги сигналов с полным фазовым спектром. Так как параметры  $\lambda_k$  являются аналогами длины периода аппроксимирующей функции, то авторы делают вывод, что чем проще форма исходного сигнала, тем меньше параметров можно использовать при аппроксимации фазового спектра. Коэффициенты  $\lambda_k$  с большими индексами  $k$  контролируют поведение сигнала на больших временах (в «хвосте» сигнала).

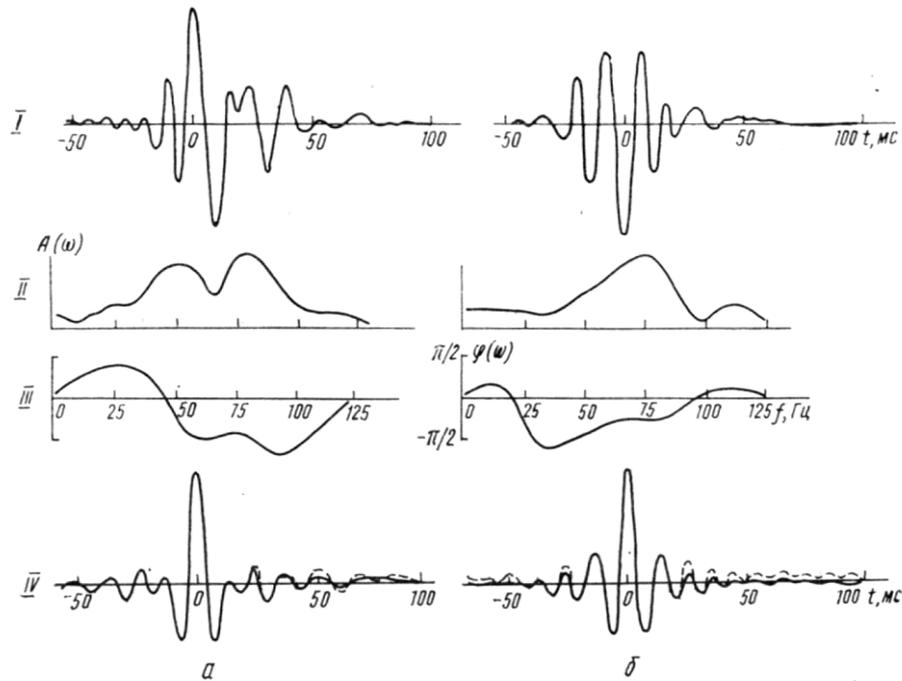


Рисунок 1.3. Аппроксимация фазовых спектров сейсмических сигналов в диапазоне 0–125 Гц. I – форма сигнала, II – амплитудный спектр, III – аппроксимация фазового спектра, IV – нуль фазовый аналог сигнала и его аппроксимация. (Малкин А.Л., Фиников Д.Б. 1989)

На практике аппроксимация фазового спектра используется в задаче сравнения трассы коридорного суммирования ВСП и волнового поля, на разрезе ОГТ. Если скважина, в которой выполнены работы ВСП, находится достаточно близко от линии профиля, то можно считать, что импульсная характеристика среды одинаковая для двух измерений ВСП и ОГТ. В таком случае изменения фазового спектра связаны с изменением формы сейсмического сигнала. Сравнение фазовых спектров требуется для привязки трассы коридорного суммирования ВСП и трассы разреза ОГТ (рисунок 1.4). При привязке данных ОГТ к скважине сопоставление фазовых спектров сводится к определению сдвига между двумя трассами и подбору поворота фазы или определению константы в фазовом спектре фильтра, приводящем трассу ОГТ к трассе ВСП. Это означает, что задача сравнения фазовых спектров двух трасс рассматривается как двухпараметрическая задача определения двух первых коэффициентов в аппроксимации фазового спектра фильтра согласования. При вычислении двух параметров разностного фазового спектра

корректирующего фильтра между двумя сейсмическими трассами наилучшие результаты достигаются при использовании коротких по времени окон.

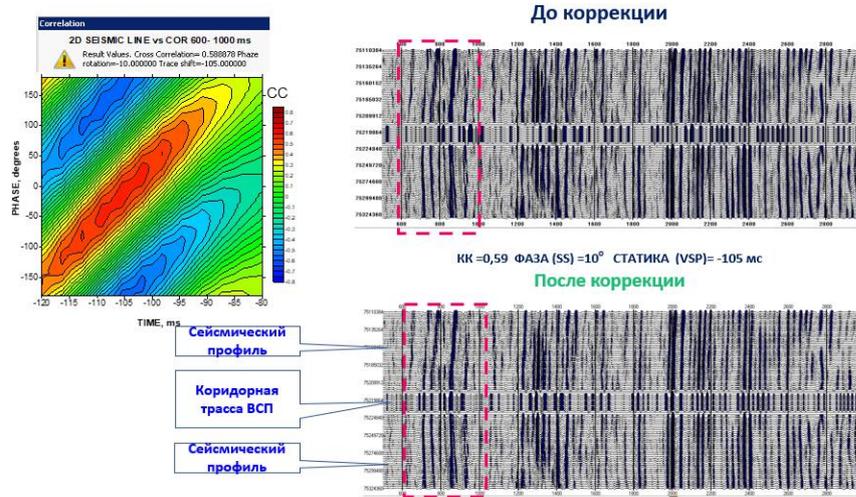


Рисунок 1.4. Использование коэффициента корреляции при сравнении трасс коридорного суммирования и трассы ОГТ с целью определения сдвига и поворота фазы. (Шевченко АА, Черкашнев С.А 2018)

#### 1.4. Использование частотно-временного разложения трассы

Применение вейвлет преобразования к сейсмической трассе можно коротко охарактеризовать как использование оконного интегрального (например, Фурье) преобразования, выполняемого таким образом, что окно разложения в спектр смещается по времени.

Рассмотрим выполнение вейвлет-разложения и его инверсию или фильтрацию, предложенные в работе О. Portniaguine, J.P. Castagna, (2004). Подход включает вейвлет-преобразование исходных данных и получение вейвлет-образа  $F$ . Затем, при обратном преобразовании, выполняется обработка для каждой вейвлет-компоненты (коэффициента разложения)  $m$ . При выполнении инверсии ищется весовой коэффициент, который минимизирует функционал:

$$\|real(Fm) - \alpha S(m)\| = \min \quad (6)$$

Фактором  $\alpha$  в функционале называется параметр регуляризации. Для решения задачи очень важно воспользоваться хорошим (правильным) вейвлет разложением и выбрать норму оценки ограничения  $S(m)$ . В работе предложены три

различных нормы. Две традиционные нормы  $L_2$ ,  $L_1$  и норма, которая называется авторами Sparse, обозначенная в формуле  $L_0$ .

$$S_{L_2}(m) = \sum_{i=1}^{N_f N_t} m_i^2 \quad (7)$$

$$S_{L_1}(m) = \sum_{i=1}^{N_f N_t} |m_i| \quad (8)$$

$$S_{L_0}(m) = \sum_{i=1}^{N_f N_t} \frac{|m_i|^2}{|m_i|^2 + \beta^2} \quad (9)$$

Рисунок 1.5 иллюстрирует сравнение трех разложений, примененных к синтетической трассе. На анализируемой трассе (левый фрагмент) присутствуют три сигнала частоты 20, 40 и 60 Гц. По форме сигнала на левой панели рисунка видно, что для каждого сигнала задано свое значение фазы. Для среднего сигнала фаза повернута на 90 градусов относительно двух других сигналов, имеющих нулевые значения фазы. Следующая панель показывает инверсию, в которой для поиска решения использовалась норма  $L_2$  (уравнение (9)). Третья (слева) панель показывает результат инверсии, в которой при поиске решения использовалась норма  $L_1$  (уравнение (10)). Правая панель показывает решение, которое искалось на основе минимизации нормы Sparse. Эти графики отображают только амплитудные распределения, фаза вейвлетов не показана.

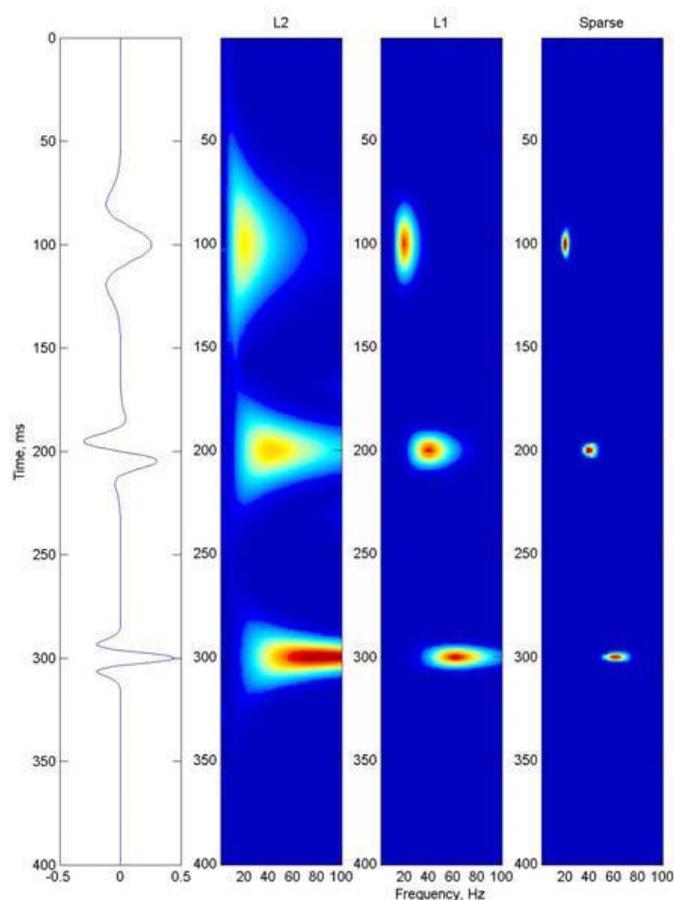


Рисунок 1.5 Иллюстрация вейвлет разложения модельной трассы и ее аппроксимация с помощью разложений  $L_2$ ,  $L_1$  и Sparse. По работе (O.Portniaguine, J.P.Castagna, 2004).

Обнаружение сигналов по сейсмической трассе, представленное на рисунке 1.5 приведено для того, чтобы объяснить принцип подхода по выделению и интерпретации сейсмических сигналов по модельной трассе. Пример на рисунке 1.6 демонстрирует выделение сигналов при инверсии сейсмической трассы в которой импульсная характеристика среды (трасса последовательности коэффициентов отражения) задана случайным (гауссовым) шумом. Сейсмическая трасса рассчитана сверткой с импульсом Рикера с частотой 30 Гц. Рассмотрим рисунок 1.6. Крайняя левая панель показывает моделируемую отражательную способность – (гауссов шум) и синтетическую трассу, полученную с помощью свертки. Следующие три панели показывают инверсии с нормами  $L_2$ ,  $L_1$  и Sparse. Результаты инверсий, выполненные с помощью различных мер, выделяют на сейсмической трассе характерные максимумы, связанные по-видимому с наиболее

сильными максимумами на сейсмической трассе. Однако достаточно наглядно видна различная разрешенность вейвлет спектров в зависимости от используемой при инверсии нормы. Можно сказать, что подход, основанный на вейвлет преобразовании позволяет при инверсии выделять устойчивые отражения и строить таким образом параметрическое описание интерпретируемой геологической модели.

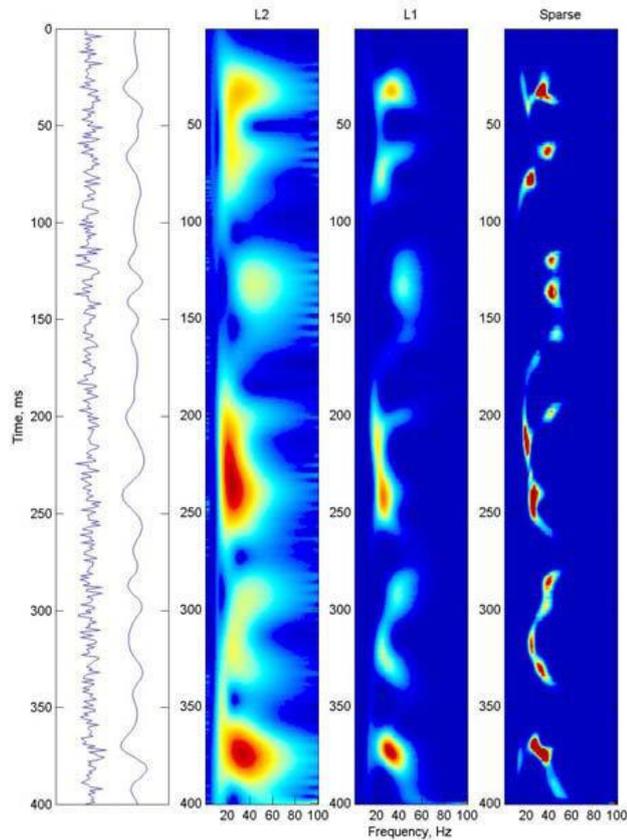


Рисунок 1.6. Иллюстрация вейвлет разложения сейсмической трассы и ее аппроксимация с помощью разложений L2, L1 и Sparse. По работе (O.Portniaguine, J.P.Castagna, 2004).

Применение данной технологии опубликовано в различных статьях, например (D.Locci – Lopez et al. 2018). В российской сейсморазведке данный подход широко применялся для анализа данных И.А.Мушиным. Большинство из подходов к интерпретации методом Спектрально Временного Анализа (СВАН) можно найти в книге «Методики спектрально-временного анализа» (Мушин И. А., Бродов Л. Ю., Козлов Е. А., 1990). Интересным направлением является применение СВАН изображений при анализе периодичности осадконакопления. Общее

определение похожих технологий называется спектральной декомпозицией. Спектральная декомпозиция – это метод сейсмического анализа, который переводит сейсмические данные в частотно-временную область. Дальнейшая интерпретация вейвлет спектра после инверсии может давать полезную информацию о наблюдаемых данных. Информацию о толщине отражающих слоев предлагается оценивать в работе Partyka et al. (1999); Puryear, Castagna (2008). Различные подходы к стратиграфической интерпретации приведены в работах: Marfurt, K. J., Kirilin R.L. (2001); Castagna et al. (2003). Существует достаточно много алгоритмов спектрального разложения, в результате которых возможно генерировать полезные для интерпретации сейсмических данных частотные атрибуты.

### **1.5. Поглощение энергии сейсмического сигнала и параметр добротности**

При распространении сейсмической волны в геологическом разрезе может происходить изменение формы сейсмического сигнала. Существуют различные физические причины изменения. Во-первых, распространяясь в Земле, сейсмический сигнал проходит через границы раздела пластов, преломляясь и отражаясь на них. Каждую границу или набор границ можно рассматривать как некоторый фильтр, меняющий форму сейсмического сигнала. Важно, что изменение формы сигнала связано с геометрией и физическими свойствами отражающих и преломляющих границ и обусловлено эффектом интерференции сейсмической волны. Одной из причин может быть неупругое поглощение энергии. Породы, через которые проходит сейсмическая волна, могут поглощать энергию, меняя тем самым форму сигнала. Поглощение энергии происходит не на границах, а в процессе прохождения волны через пористую или трещиноватую среду, как правило, заполненную флюидом. Обычно для измерения поглощения сейсмической энергии и изменения формы сейсмического сигнала используют сейсмические данные ВСП. Существуют работы, в которых авторы предлагают различные методики измерения (Авербух А.Г. 1982; Авербух и др. 1981, 1987;

Рапопорт М.Б., Рыжков В.И. 2003; Рапопорт М.Б. и др. 1997), однако общая идея сводится к сравнению сигналов падающей волны, зарегистрированной на двух различных уровнях наблюдения. Частотно-зависимое поглощение определяется по логарифму отношения спектров двух сигналов и характеризует изменение спектра сигнала, обусловленное потерями, связанными с вязкостью и теплопроводностью среды.

$$\varepsilon = \frac{1}{S} \ln \left[ \frac{A_2(\omega)}{A_1(\omega)} \right] \quad (10)$$

здесь  $A_1$  и  $A_2$  частотные спектры сигналов, зарегистрированных на двух уровнях, а  $S$  некоторая нормирующая величина, характеризующая расстояние, на котором происходит поглощение энергии сигнала. Главная закономерность, обоснованная теоретически и подтвержденная экспериментальными исследованиями, заключается в монотонном возрастании поглощения с увеличением частоты. Для оценки коэффициентов поглощения упругих волн часто используют эмпирическую формулу:

$$\varepsilon = \frac{2 \omega^3}{V_p^n} \quad (11)$$

где  $V_p$  – скорость продольной волны, по спектру которой выполняется анализ поглощения,  $\omega$  – частота сейсмического или акустического сигнала  $n > 1$ .

В современной геофизической литературе достаточно часто изменение спектров сейсмической волны оценивается параметром добротности –  $Q$ . Принципиально параметр  $Q$  не декларирует зависимости изменения спектра сигнала от конкретных физических причин, в отличие от поглощения, под которым понимается потеря энергии сигнала за счет температурных потерь или вязкости среды. Параметр  $Q$  величина обратная декременту поглощения:

$$\varepsilon = \frac{\pi}{Q} \quad (12)$$

$$Q^{-1} = \frac{1}{\pi f(t_2 - t_1)} \ln \left[ \frac{A_2(\omega)}{A_1(\omega)} \right] \quad (13)$$

В общем случае не существует технологии разделения физических причин или факторов влияния на спектр сигнала. Поглощение может быть интегральным и монотонно накапливаться при прохождении волн через геологическую среду. С другой стороны, изменение формы сигнала может быть приурочено к определенному геологическому объекту, например, к газовой залежи. Или причиной поглощения могут быть нелинейные эффекты, связанные с возбуждением сигнала. В этом случае существуют локальные области повышенного поглощения энергии сигнала, а могут быть слои или другие объекты, в которых изменение формы сигнала отсутствует и поглощения нет.

Разработка методов определения поглощения или добротности сейсмических волновых полей очень широко представлена в работах, опубликованных в России (Авербух А.Г. 1982; Авербух и др. 1981, 1987; Рапопорт М.Б., Рыжков В.И. 2003; Рапопорт М.Б. и др. 1997; Жуков А.М. 1981). Большинство опубликованных методов предлагают различные технические подходы к измерению неупругого поглощения или добротности, основанные на физических принципах частотно-зависимого изменения формы сейсмического сигнала.

С несколько иной стороны рассмотрена задача компенсации поглощения и предложена технология полевых работ с использованием  $Q$  – свипов, где предусмотрено увеличение энергии свип-сигналов с ростом частоты. При этом рост энергии регулируется линейно в области логарифмического спектра, компенсируя нелинейные искажения, возникающие при возбуждении свип-сигналов (Жуков А.П. и др. 2011; Адиев Т.Р., Коротков И.П. 2023). Принцип компенсации искажений сводится к использованию параметрического подхода к определению и компенсации фазовых и амплитудных искажений в свип-сигнале, происходящих при нелинейном взаимодействии плиты вибратора и грунта. Параметры подобранных фильтров предполагается использовать для фильтрации данных с целью коррекции искажений или по возможности с целью получения более широкого спектра сигнала на коррелограммах.

## **1.6. Расширения спектра сейсмической записи на основе нелинейной фильтрации**

Параметрические подходы в обработке сейсмических данных используются для восстановления информации, потерянной при полевых наблюдениях или вследствие сильного искажения при прохождении волн через поглощающую среду, например, газовую залежь. Большинство таких методов можно отнести к разряду «интерпретационных» или требующих интерпретационного сопровождения при их выполнении. В качестве примера параметрического подхода к восстановлению искаженной информации опишем алгоритм расширения амплитудного спектра суммарных данных – RFSC (Reference Frequency Spectrum Correction). Данный алгоритм использует информацию о базовой (референтной) части спектра для того, чтобы восстановить другие части спектра, которые по некоторым причинам были искажены. Общий подход к расширению спектра сейсмического сигнала сводится к двум шагам. На первом шаге применяется процедура нелинейного преобразования выделенной области спектра сигнала, а на втором шаге выполняется объединение двух или нескольких спектральных панелей. Порядок работы, следующий:

- Вся сейсмическая запись разбивается на полосы частот – панели. В исходных данных может быть выделено несколько частотных панелей;
- назначается базовая панель, которая не подлежит изменению и служит опорой для определения параметра нормировки остальных панелей;
- выбирается для нормировки спектральная панель, амплитуда которой нормируется к уровню, определяемому по параметру, рассчитанному из базовой модели;
- результат нелинейной фильтрации получается объединением базовой и скорректированной спектральных панелей.

На рисунке 1.7 приводится главная идея метода коррекции амплитудных спектров, применяемая в технологии RFSC. Как правило, низкочастотная часть спектра достаточно хорошо и без существенных искажений представлена на

сейсмических разрезах и кубах. Поэтому в данном примере низкочастотная часть остается без коррекции. Область спектра выделена на рисунке черным цветом. Синим цветом выделена базовая модель, которая служит для вычисления уровня амплитуды, к которому корректируются остальные частотные панели, выделенные на рисунке зеленым цветом.

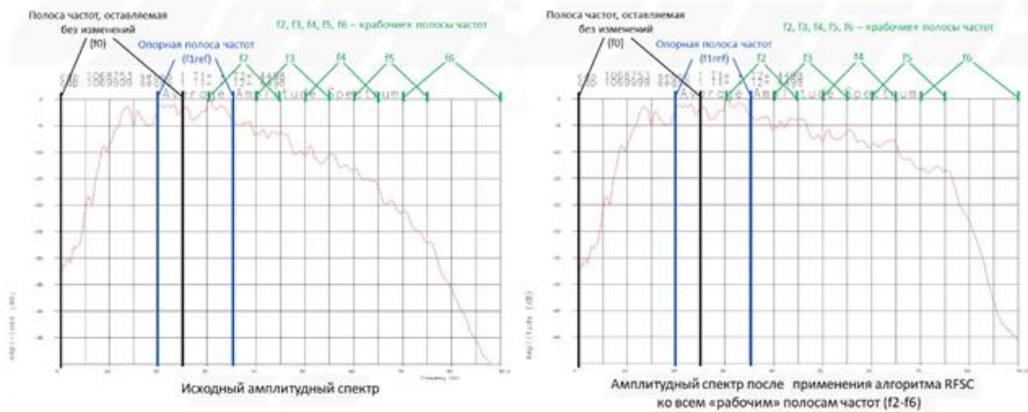


Рисунок 1.7. Идея алгоритма RFSC на одном амплитудном спектре

На рисунках 1.8–1.10 приведены примеры работы программы RFSC на тестовом профиле. На рисунке 1.8 демонстрируется анализ разбиения исходных данных на частотные панели и предварительное сглаживание по времени амплитуд на базовой частотной панели. На рисунке 1.9 приведены результаты амплитудной коррекции двух различных частотных панелей. На рисунке 1.10 приведен пример работы программы RFSC после параметрической коррекции амплитуд для пяти частотных панелей. Параметрическая коррекция амплитуд в различных диапазонах частот относится к программам обработки «интерпретационного» типа. Это означает, что пользователь имеет возможность выбора компромиссного решения при расширении спектра сигнала, которое обеспечивает лучшую (с его субъективной точки зрения) корреляцию данных со скважинами.

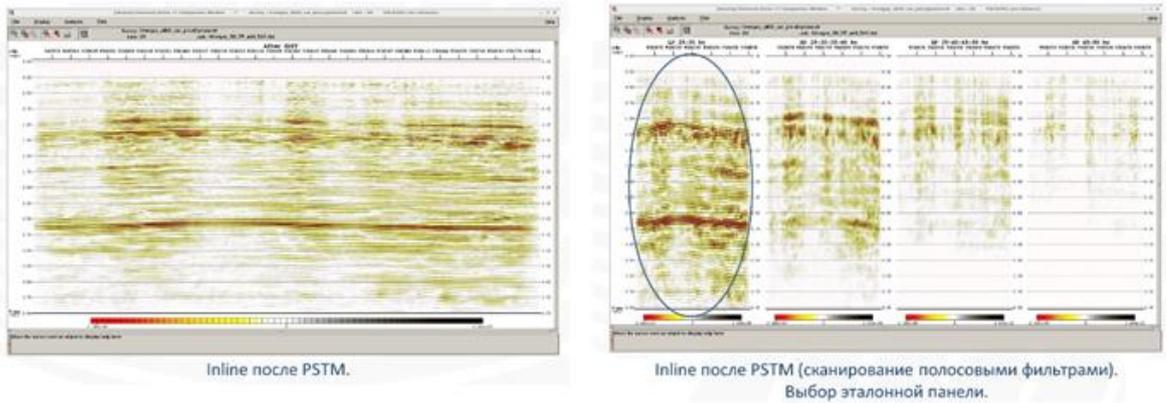


Рисунок 1.8. Выбор базовой спектральной модели

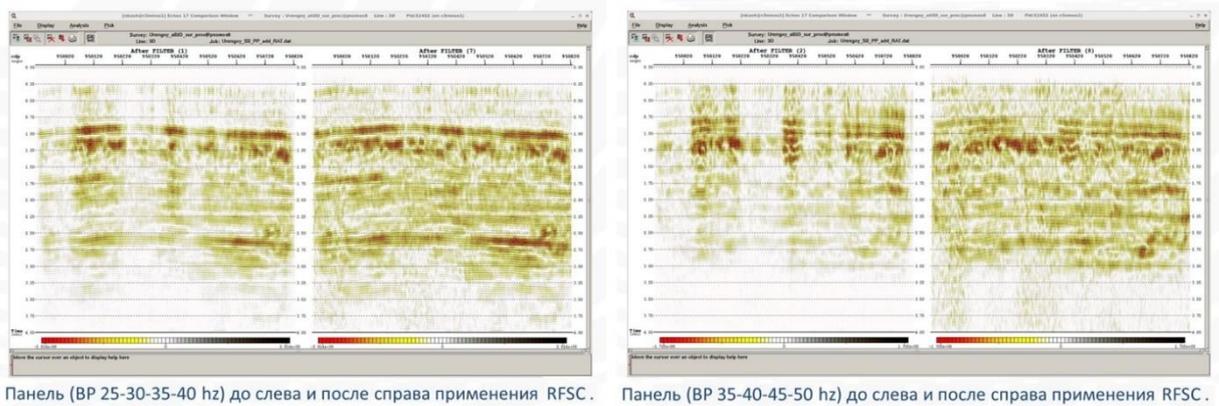


Рисунок 1.9. Пример восстановления амплитуд на спектральных панелях

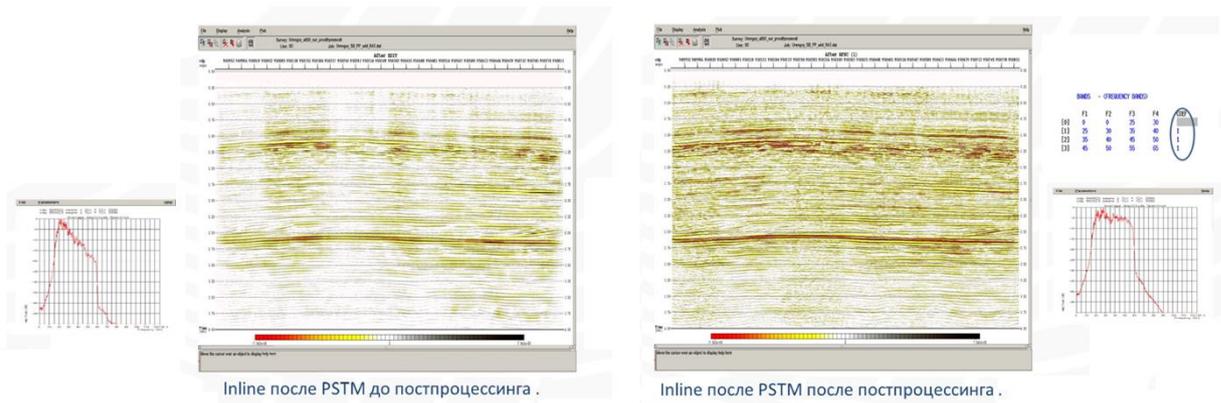


Рисунок 1.10. Пример применения программы RFSC

### **1.7. Постановка задачи определения и компенсации искажений сейсмических данных**

Исходя из целей работы требуется разработать методы параметрического способа сравнения и коррекции искажений сейсмических сигналов, возникающих при возбуждении, распространении и регистрации.

Искажения сейсмических сигналов чаще всего оцениваются путем сравнения наблюдаемого сигнала с идеальным, определённым геофизиком в соответствии с поставленной задачей. Таким эталоном может быть минимально-фазовый 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. При повторных сейсмических наблюдениях (4D или Time Lapse) под искажениями сейсмического сигнала могут пониматься изменения амплитудного или фазового спектра сейсмического сигнала, не связанные с геологическими факторами, обусловленными разработкой поискового объекта или объекта, в который выполняется закачка флюида или CO<sub>2</sub>.

### **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 Полубояринова М.А., Финикова Д.Б. (2006) используются специальные преобразования, ограничивающие частотный диапазон расчета параметров, что применимо и в нашей работе. Однако в работах Жукова А.П. и др. (2011); Адиева Т.Р., Короткова И.П. (2023); Королева 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 вибросейсморазведке 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.

В следующих главах работы рассмотрим параметрические подходы к определению сейсмического сигнала и использование параметров для коррекции искажений, вносимых в сейсмическую запись при возбуждении и регистрации

волновых полей. Разрабатываемые подходы будут основываться на положениях, сформулированных в данном параграфе.

## ГЛАВА 2. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ ПОДХОД К КОРРЕКЦИИ ФОРМЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО СИГНАЛА<sup>1</sup>

В обработке существует тенденция использования параметрических подходов к описанию формы сейсмического сигнала и его моделированию. Цель перехода к параметрической коррекции сейсмического сигнала обусловлена несколькими причинами:

Во-первых, форма сейсмического сигнала на практике достаточно стабильна и ее изменения происходят постепенно, так как причина этих изменений, будь то геологическая среда или некоторый источник помех, имеет, как правило, относительно большой пространственный масштаб.

Во-вторых, вводя один или несколько неизвестных параметров в задачу определения формы сигнала, мы пытаемся построить класс моделей волновых полей, в которых есть изменение формы сейсмического сигнала. Определив модель сейсмического сигнала, мы пытаемся исследовать и определить неизвестный параметр или параметры. Одним из возможных способов определения параметров могут быть алгоритмы оптимизации.

### 2.1. Параметрический подход к сравнению амплитудных спектров

При параметрическом подходе к сравнению и коррекции амплитудных спектров мы будем использовать построение корректирующего фильтра с помощью одного параметра, задающего наклон логарифмического спектра оператора. Для сравнения выбираем два сигнала, один из которых соответствует желаемому результату фильтрации, а второй соответствует исходному и требующему коррекции сигналу. Таким образом, определяется задача

---

<sup>1</sup> При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

1. **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).

сопоставления амплитудных спектров для двух сигналов. На практике у нас может отсутствовать базовое волновое поле, представляющее собой желаемое неискаженное состояние, к которому нужно привести «искаженный» сигнал. В таком случае можно задать эталонный, идеализированный сигнал, который мы хотели бы получить после корректирующей фильтрации. Таким образом, задачу коррекции можно рассматривать как поиск оператора, корректирующего амплитудный спектр, при наличии двух сигналов: одного, представляющего базовое или эталонное волновое поле, и другого, который требует коррекции.

Для того чтобы выполнять коррекцию (однопараметрическое изменение 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 компенсирующего 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.

$$Q^{-1} = \frac{1}{\pi f(t_2 - t_1)} \ln \left[ \frac{A_2(\omega)}{A_1(\omega)} \right] \quad (14)$$

Здесь  $A_1(\omega)$  амплитудный спектр сигнала, к которому мы стремимся привести волновое поле с амплитудным спектром сигнала  $A_2(\omega)$ . При этом в формуле для расчета добротности зафиксируем параметр времени, установив для всех фильтров  $(t_2 - t_1) = 1$ .

На рисунке 2.1 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.

Для того чтобы фильтры не создавали дополнительных артефактов в алгоритм построения, введено условие непрерывности графика производной логарифмического спектра оператора. На рисунке 2.2. приведены графики логарифмических спектров и их производных, рассчитанных для двух сигналов с требованием непрерывности производной. Два построенных фильтра имеют значения параметра  $Q$  +50 и -50. Рабочий диапазон фильтрации от 30 до 60 Гц. В этом диапазоне графики производной имеют постоянные значения, в соответствии с заданными параметрами  $Q$  (+50 и -50). В области сглаживания производная логарифмического спектра меняется без разрывов от 0 до +50.

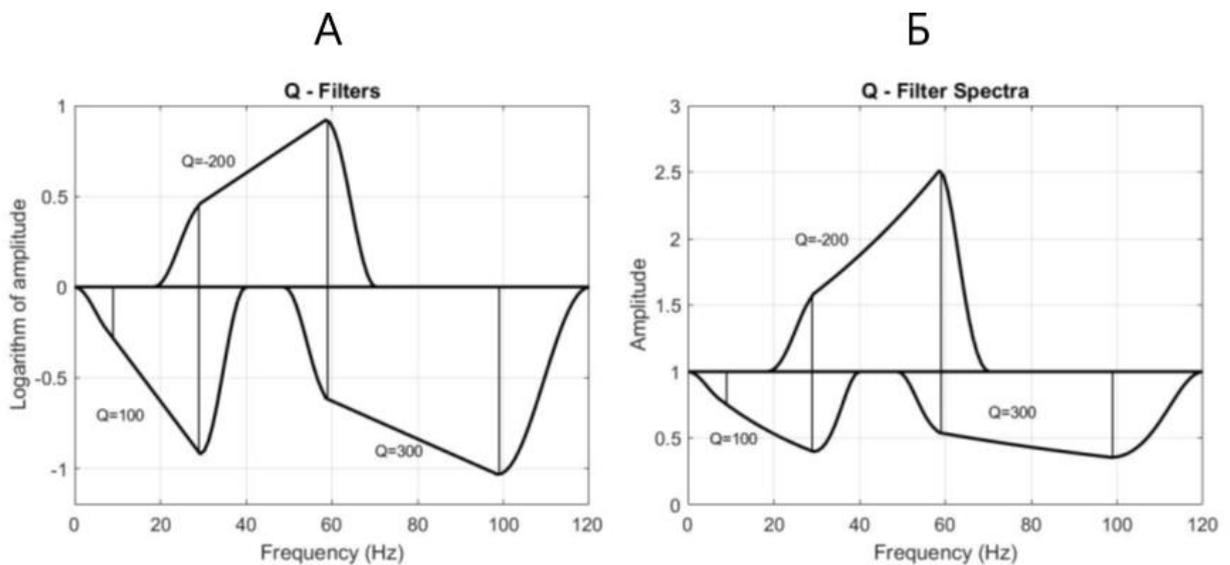


Рисунок 2.1. Задание логарифмического спектра Q-фильтров (А).  
 Спектры Q-фильтров (Б). (Параметры  $Q=100, -200, 300$ )

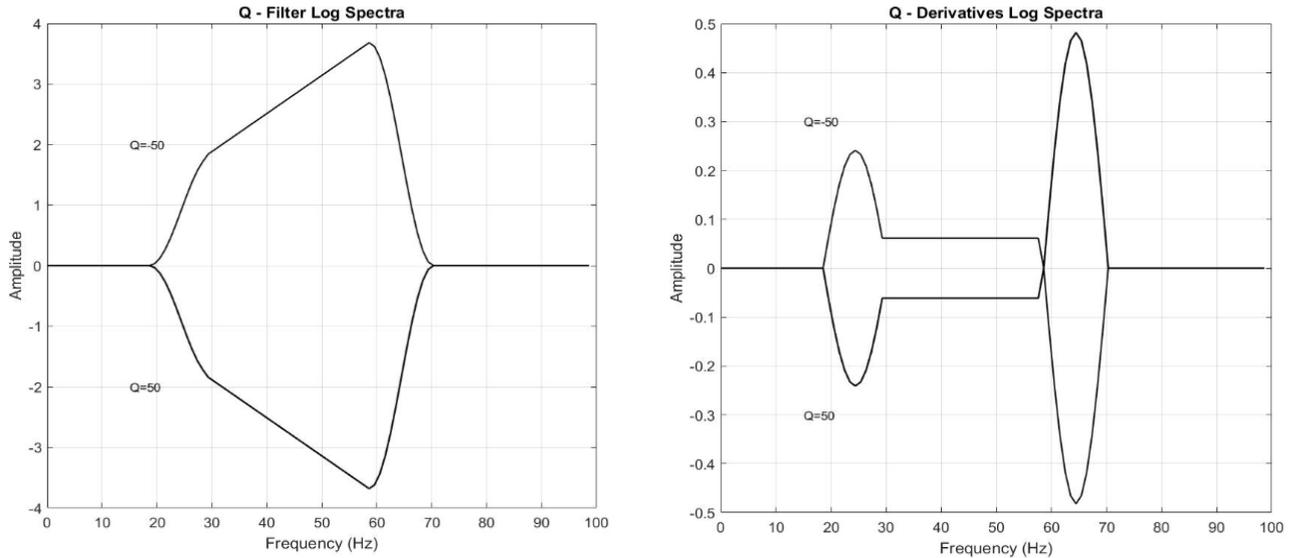


Рисунок 2.2. Задание логарифмического спектра Q-фильтров (А).

Производная логарифмического спектра Q-фильтров (Б). (Параметры  $Q=-50, +50$ )

При коррекции амплитудного спектра мы планируем изменять сигнал только в выбранном диапазоне частот. Следовательно, амплитудно-частотная характеристика корректирующего фильтра во всем диапазоне частот, за исключением корректируемого, должна быть равна 1. Для этого определим полосовой фильтр, в некотором широком диапазоне частот, к которому применим корректирующий фильтр. Результат применения и будем считать построенным корректирующим фильтром, изменяющим только выбранный диапазон частот и оставляющий без изменения оставшийся диапазон частот базового полосового фильтра. Мы предполагаем, что полосовой фильтр будет всегда иметь более широкий диапазон частот, чем диапазон коррекции.

На рисунке 2.3. приведены амплитудные спектры и операторы фильтрации для двух взаимно обратных фильтров  $Q=50$  и  $Q=-50$ , в частотном диапазоне (20,30,60,70 Гц). Хорошо видно, что спектры фильтров гладкие и области подавления пропускания фильтров совпадают. Построенные таким образом операторы фильтра мы предполагаем использовать в тестировании сравнения сигналов и подборе компенсации искажения сигнала.

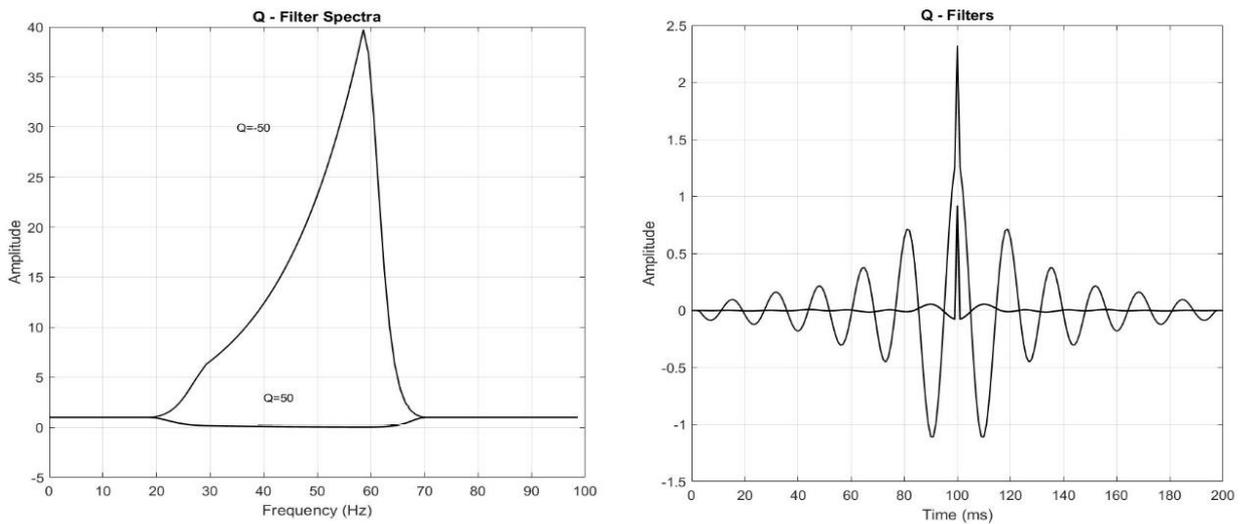


Рисунок 2.3. Спектры Q-фильтров (А). Операторы Q-фильтров (Б).  
(Параметры  $Q=-50$ ,  $Q=+50$ )

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 2.4. показан тестовый сейсмический сигнал длительностью 201 мс и его амплитудный спектр.

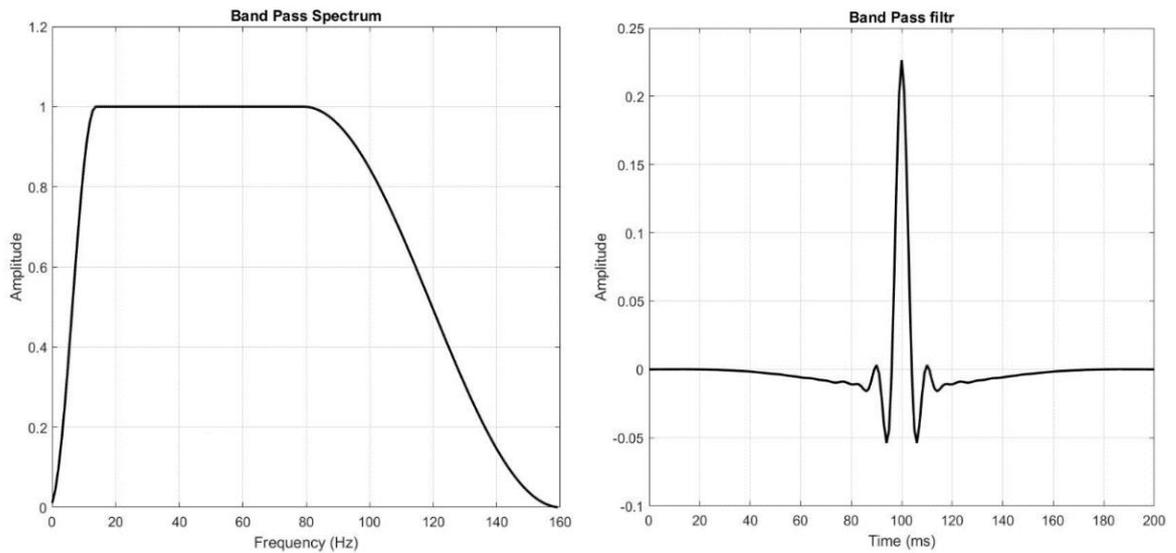


Рисунок 2.4. Спектр полосового сигнала для тестирования параметрической амплитудной коррекции (А). Сигнал полосового фильтра, используемый как тестовый сигнал источника (0, 15, 80, 160 Гц).

Построим фильтр с параметром  $Q=+50$  в ограниченном частотном диапазоне (20,30,60,70). И применим его к исходному полосовому сигналу (рисунок 2.5). Применение фильтра с параметром  $Q=-50$  в том же частотном диапазоне показано на рисунке 2.6. Таким образом, мы создали два различно искаженных сейсмических импульса. Сравнивая полученные фильтры (Рисунок 2.7) можно видеть, что применение фильтра  $Q=-50$  (левый фрагмент) привело к излишнему повышению частоты и сильному изменению формы сигнала, таким образом, что он стал узкополосным и близким к синусоиде. Подавление фильтром  $Q=50$  средних частот (Рисунок 2.7 правый фрагмент) привело к тому, что визуально на сигнале видны плавные низкочастотные колебания, и остались колебания высокочастотные, особенно в области главного максимума.

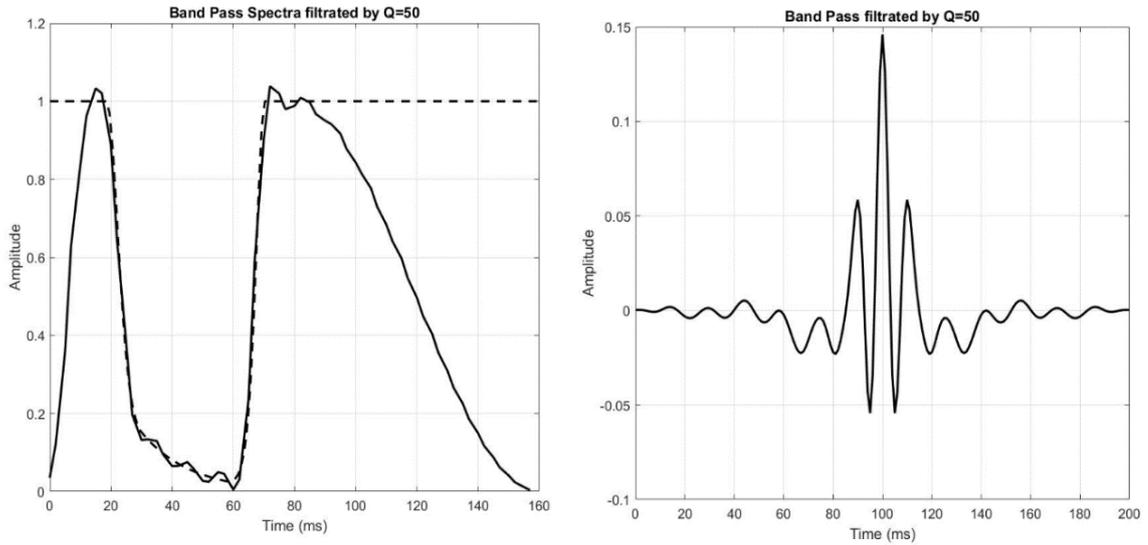


Рисунок 2.5. Спектры полосового фильтра после фильтрации фильтром с параметром  $Q=50$  и соответствующий сейсмический сигнал после применения фильтра с параметром  $Q=50$ . Пунктиром нанесен спектр фильтра с параметром  $Q=50$ .

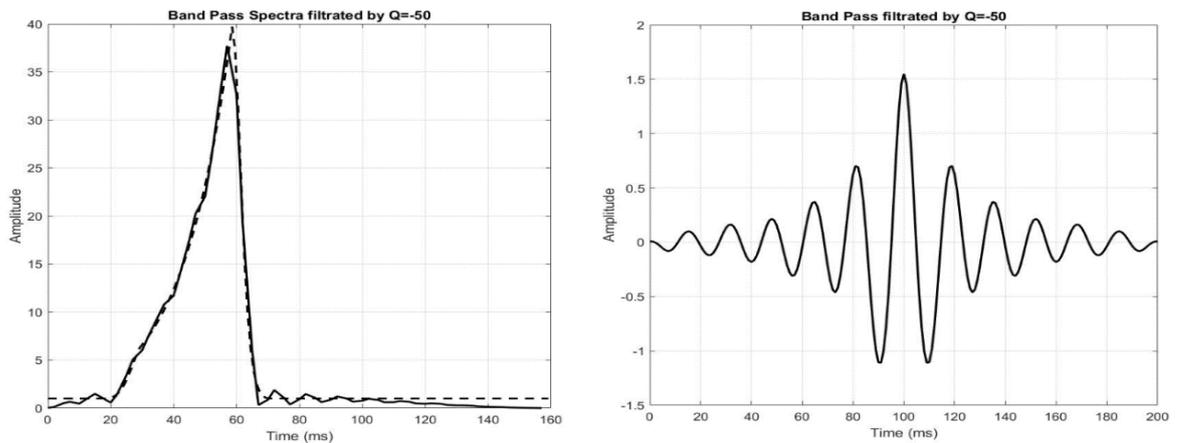


Рисунок 2.6. Спектры полосового фильтра после фильтрации фильтром с параметром  $Q=-50$  и соответствующий сейсмический сигнал после применения фильтра с параметром  $Q=-50$ . Пунктиром нанесен спектр фильтра с параметром  $Q=-50$ .

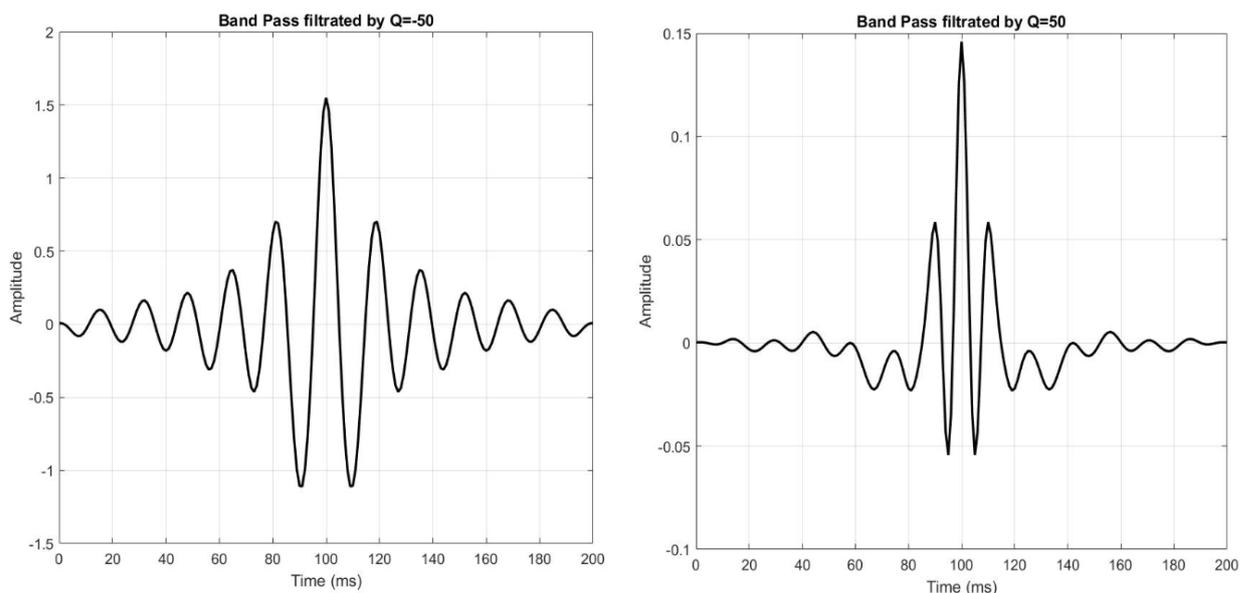


Рисунок 2.7. Сигналы исходного полосового фильтра после «искажения» амплитудными фильтрами. Слева с параметром  $Q=-50$ , справа с параметром  $Q=50$ .

Повторное применение восстанавливающих  $Q$  фильтров приведено на рисунке 2.8. Для восстановления мы применили фильтры с обратными знаками по отношению к фильтрам, искажающим сигнал. Сравнение сигналов после двух фильтраций с исходным сигналом (обозначенным на рисунке красной линией) показывает, что в области главного максимума сигналы практически совпадают, что демонстрирует корректность процедуры построения и применения  $Q$  фильтров.

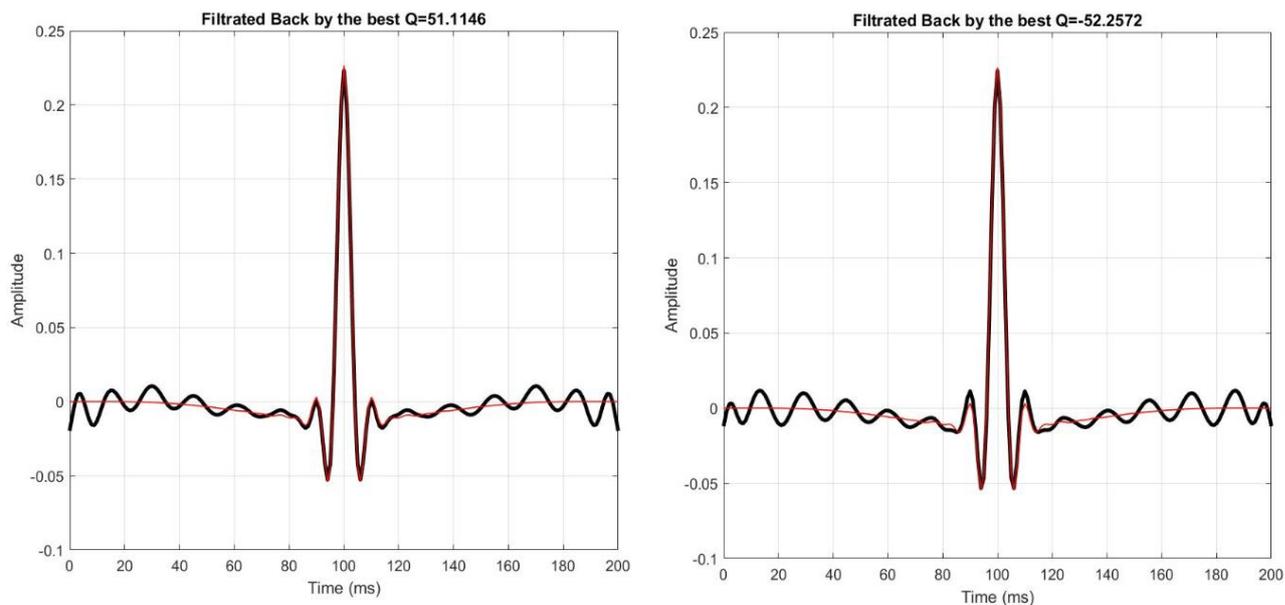


Рисунок 2.8. Сигналы после итеративного подбора обратного фильтра и компенсации «искажения». Слева с найденным параметром  $Q=51$ . Справа с найденным параметром  $Q=-52$ . Красной линией показан исходный сигнал полосового фильтра.

Для реальных данных спектры сигналов могут иметь достаточно сложную форму. Поэтому полная компенсация искажений сигнала при помощи однопараметрического корректирующего фильтра в общем случае невозможна. Однако использование параметрического подхода к коррекции сигналов позволяет находить устойчивые компенсирующие фильтры для использования их при обработке сейсмических данных.

## 2.2. Параметрические подходы к определению и сравнению фазовых спектров

Рассматривая согласование фазового спектра двух сейсмических трасс, мы будем считать, что для решения задачи не требуется коррекция амплитудного спектра. Тогда оператор согласования  $W$  имеет единичный амплитудный спектр и фазовый спектр равен разностному фазовому спектру:

$$\varphi(\omega) = \varphi_f(\omega) - \varphi_g(\omega) \quad (15)$$

Здесь  $\varphi_f$  – фазовый спектр трассы, к которой выполняется коррекция,  $\varphi_g$  – фазовый спектр корректируемой трассы. Разностный фазовый спектр можно аппроксимировать полиномом некоторой фиксированной степени.

$$\varphi(\omega) \approx a_0 + a_1\omega + a_2\omega^2 \quad (16)$$

$a_0$  – определяет поворот фазы;  $a_1$  – отвечает за взаимный сдвиг двух трасс;  $a_2$  – определяет некоторый фазовый фильтр, смещающий фазы различных частотных составляющих.

На рисунке 2.9. приведен модельный пример, в котором сравниваются две трассы (фрагменты А и Б), различающиеся между собой временным сдвигом 5.4 мс и фазовым поворотом – 58 градусов. Для того чтобы определить параметрический фазовый фильтр, рассчитывается карта взаимных корреляций двух трасс  $R(\Delta t, \varphi)$  (Рисунок 2.9С). Каждая точка карты – это значение взаимной корреляции трассы  $f$ , к которой выполняется приведение, и корректируемой трассы  $g$  после применения к ней коррекции с двумя пробными параметрами  $(\Delta t, \varphi)$ . Пример демонстрирует методику решения задачи. Сначала строится распределение  $R(\Delta t, \varphi)$  (Рисунок 2.9С) и определяется минимальное значение искомым параметров  $(\Delta t, \varphi)$ . Затем выполняется коррекция фазового спектра трассы  $g$ . Компенсация временного сдвига и фазового поворота обычно выполняется с помощью последовательного временного сдвига трассы и последующего применения процедуры поворота фазы, основанного на использовании преобразования Гильберта. Однако, как показано на рисунке 2.9.D, можно рассчитать один общий оператор фазового фильтра  $W(\Delta t, \varphi)$  и применить его к корректируемой трассе. Фазовый спектр оператора  $W(\Delta t, \varphi)$  имеет вид линейной функции с двумя коэффициентами ( $a_0$  и  $a_1$ ). Коэффициент  $a_1$  – определяет временной сдвиг корректируемой трассы, а постоянное значение  $a_0$  – соответствует значению угла поворота фазы.

В качестве меры близости двух трасс обычно используется коэффициент корреляции (R.White и др. 2003). Могут быть выбраны и другие оценки близости

трасс, например, известные меры NRMS или SDR, применяемые в сейсморазведке 4Д (Kragh, E. и др. 2002; Cantillo J, 2012). Важно то, что оптимальность параметров фазового фильтра определяется по результату применения фильтра к сейсмической трассе  $g$ . При коррекции спектра на реальных данных из-за наличия шума две пары значений  $(\Delta t_1, \varphi_1)$  и  $(\Delta t_2, \varphi_2)$ , выбранных как оптимальные с распределения  $R$ , могут быть выбраны из некоторой области на карте, а результаты применения к корректируемой трассе двух фазовых фильтров  $W1$  и  $W2$  будут похожими, с точки зрения выбранной меры близости. На Рисунке 2.9.С выделена черным цветом область, внутри которой значение корреляционной меры меньше  $R_0=0.075$ . Это значит, что все пары значений  $(\Delta t_i, \varphi_i)$ , выбранные из этой области, в некотором смысле эквивалентны. То есть после расчета и применения двух различных фазовых фильтров результат коррекции будет мало различаться.

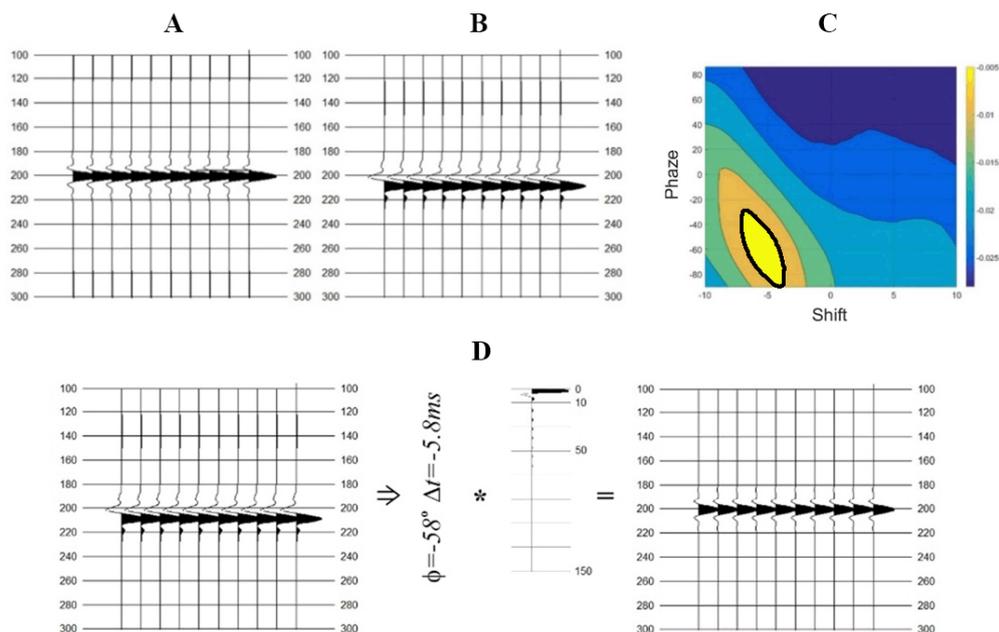


Рисунок 2.9. Неискаженный сигнал (А) и сигнал, сдвинутый по времени на 5.4 мс и с повернутой на  $60^\circ$  фазой (В). Распределение меры близости  $R$  двух трасс – (С); D – Фазовая фильтрация для приведения сигнала к исходной неискаженной форме сигнала выполняется одним оператором, имеющим две компоненты преобразование сдвига и поворота фазы.

На рисунке 2.10.А приведен амплитудный спектр модельного сигнала, одинаковый для двух сравниваемых трасс, имеющих различный фазовый спектр.

Как правило, распределение оценок  $R$  (Рисунок 2.10.В) имеет вытянутую вдоль одного направления форму. Мы можем выделить некоторое сечение ( $A-A$ ) вдоль этого направления и выбрать из всего массива множество пар  $(\Delta t_i, \varphi_i)$ , значения которых лежат вдоль выбранного сечения. На рисунке 2.10.D показано такое сечение  $R$ , на нем точками выделены отдельные пары  $(\Delta t_i, \varphi_i)$  и подписаны соответствующие значения поворота фазы. На фрагменте (рисунок 2.10.C) в спектральной области нарисованы прямые линии, каждой линии соответствует своя пара принадлежащая графику (рисунок 2.10.D) и, соответственно, принадлежащая сечению  $A-A$  (рисунок 2.10.В). Прямые линии – это фазовые спектры различных фильтров. Интересно, что все прямые пересекаются в окрестности одной точки. Частота этой точки близка к средней частоте амплитудного спектра, а значение фазы в данной точке есть некоторое оптимальное значение фазы, которое характеризует различие двух сигналов на средней частоте. Там, где амплитудный спектр имеет относительно небольшие значения, фазовый спектр практически не будет влиять на изменение формы сигнала. Точки пересечения различных фазовых спектров или главное (среднее) значение корректирующей поправки определяются в области, где амплитудные спектры двух сравниваемых сигналов имеют максимумы. Представленный метод графического подбора параметров фазового фильтра реализуется на практике интерпретационных процедур сопоставления данных ОГТ и трассы коридорного суммирования ВСП.

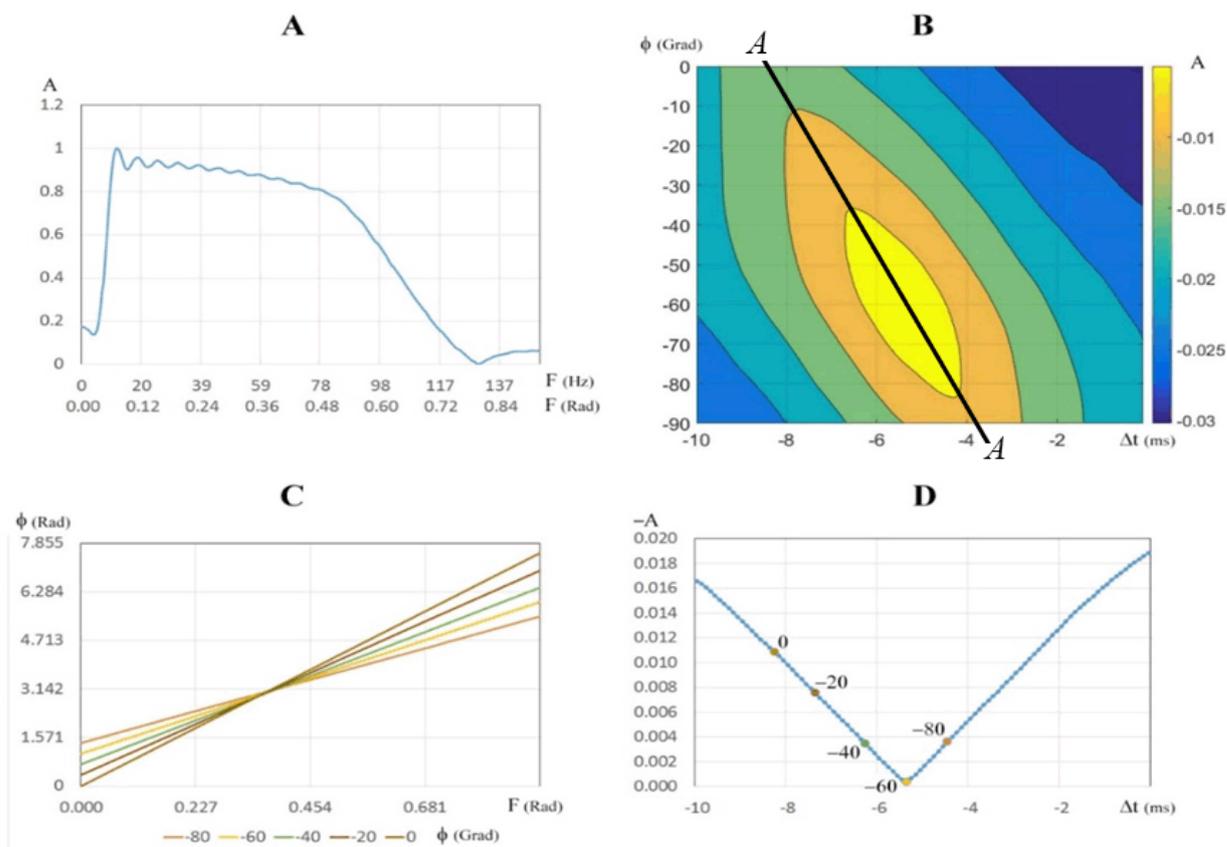


Рисунок 2.10. Построение набора фазовых фильтров при процедуре сравнения двух сигналов. А – Амплитудный спектр сейсмического сигнала. В – распределение меры  $R$ , зависящее от двух параметров (сдвиг  $\Delta t$ , поворот); С – фазовые характеристики различных фильтров, индекс прямой – значение угла поворота фазы  $\varphi$ ; D – Кривая амплитуд, снятая с фрагмента В вдоль сечения (А – А). Точки на кривой обозначают положение пары  $(\Delta t_i, \varphi_i)$  на карте  $R$ . Индекс прямой  $\varphi$  на фрагменте В соответствует индексу точки на фрагменте D.

### 2.3. Нахождение фазового фильтра, зависящего от трех параметров.

Если в уравнении (1), аппроксимирующем фазовый спектр, использовать три параметра ( $a_0, a_1, a_2$ ), то форма фазового спектра будет описываться кривой второго порядка, то есть будет иметь дополнительную кривизну, в отличие от двухпараметрической прямой. В качестве иллюстрирующего примера на рисунке 2.11.D приведен фазовый спектр, зависящий от трех параметров. В алгоритме поиска оптимальной аппроксимации фазового спектра принципиальных

изменений нет. Мера близости двух трасс не меняется, поиск оптимальных параметров фильтра  $W(\Delta t, \varphi, C)$  выполняется в трехмерном пространстве, то есть ищутся три параметра  $(\Delta t, \varphi, C)$ , вместо карты распределение параметра  $R$  рассчитывается трехмерный объем. На рисунке 2.11. (А–С) показаны сечения куба плоскостями, проходящими через некоторую центральную точку объемного распределения  $R=R(\Delta t, \varphi, C)$ . Проблема неоднозначности определения параметров фазового спектра остается такой же, как и для двухпараметрического подбора. При ограниченном спектре сейсмического сигнала и наличии помех существует множество параметров аппроксимации, которые можно назвать эквивалентными.

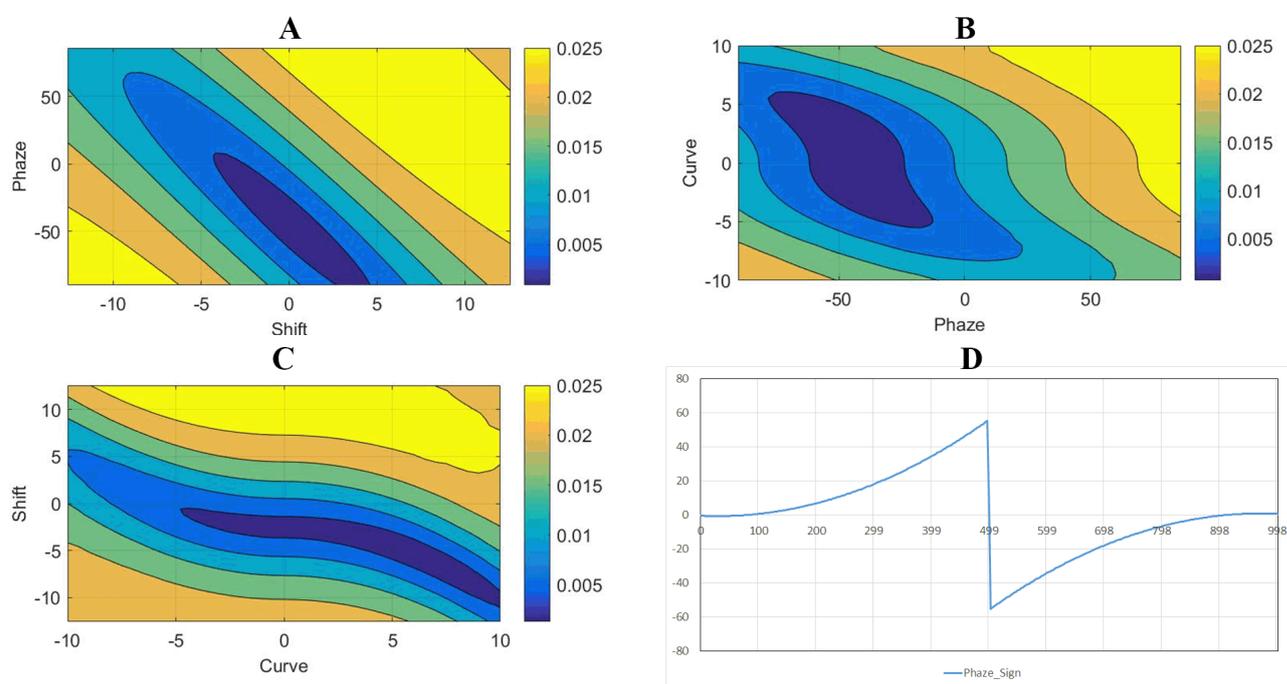


Рисунок 2.11. Сечение куба значений функции  $R$  при трех переменных коэффициентах фазового фильтра. Обозначения Phase – поворот фазы; Shift – взаимный сдвиг двух трасс; Curve – кривизна фазового спектра. D – Пример фазового спектра оператора фильтра, заданного полиномом второй степени с коэффициентами  $a_0=33^\circ$ ,  $a_1=2.3\text{мс}$ ,  $a_2=-4.5\text{мс}$ .

Построенные на их основе фазовые фильтры после применения к корректируемой трассе дают похожий результат. На рисунке 2.12. приведены графики фазового спектра и результат их аппроксимации тремя параметрами, определенными по распределению корреляций. На рисунке видно, что график

разностного фазового спектра двух трасс и его аппроксимация совпадают в частотном диапазоне 20–40Гц, то есть там, где амплитудный спектр модельной трассы имеет большие значения.

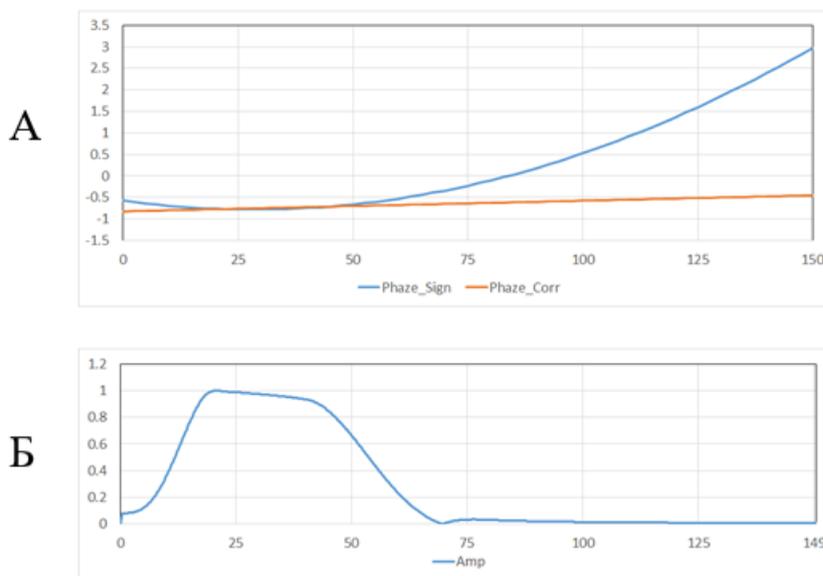


Рисунок 2.12. Аппроксимация фазового спектра сигнала по трем параметрам, выполненная с помощью программы оптимизации. А – исходный фазовый спектр (голубой) и его аппроксимация (коричн). В – амплитудный спектр сигнала, имеющий существенные значения в диапазоне 20–40Гц. -47.616119  
0.425452 -0.000097.

Использование трехпараметрической коррекции сигналов на практике выполняется с помощью расчета и применения фазового фильтра, включающего в себя три компоненты: фазовый поворот, временной сдвиг и фильтр, корректирующий кривизну фазового спектра. Каждая из трех компонент фазового фильтра имеет свою частотную характеристику и при фильтрации сигналов может изменять форму и положение экстремумов сейсмического сигнала. Несмотря на то что форма фазового спектра каждой отдельной компоненты уникальна, результат применения фильтров к компонентам может быть похожим. Это наиболее заметно для сигналов с узким по частоте амплитудным спектром. Рассмотрим операторы и частотные характеристики трех компонент фазовой фильтрации для сдвига сейсмического сигнала на -3мс. На рисунке 2.13.А представлен оператор и спектр

фазового фильтра, который при его применении выполняет поворот фазы. Если задать видимую частоту сейсмического сигнала, то применение оператора поворота на  $90^\circ$  сдвинет сигнал на четверть периода. Исходя из этого предположения можно просто рассчитать требуемый фазовый поворот оператора. Однако есть существенное ограничение, так как изменение положения максимума сигнала поворотом фазы может выполняться на величину не более четверти периода. На фрагменте рисунка 2.13.Б показан оператор сдвига и линейный спектр оператора. На фрагменте рисунка 2.13.В показан оператор и спектр, выполняющий изменение кривизны фазового спектра. Спектр данного оператора похож на оператор сдвига. Анализируя форму спектра оператора, можно видеть, что для каждой частотной компоненты определена величина сдвига фазы и, следовательно, подвижка во времени, которая может быть численно определена. Форма оператора фильтра показывает, что при изменении кривизны фазового спектра происходит существенное изменение формы сигнала.

Иллюстрацию сдвигов сигнала на различные интервалы времени можно видеть на рисунке 2.14. На первом верхнем фрагменте приведен амплитудный спектр нульфазового сигнала, который фильтруется различными компонентами фазового фильтра. Очевидно, что только оператор сдвига не изменяет форму сигнала при сдвиге. Для операторов поворота фазы и изменения кривизны при увеличении величины сдвига происходит существенное изменение формы сигнала. Причем можно видеть, что применение фазового поворота не изменяет длину сигнала, а только перераспределяет энергию сигнала между его центральными максимумами. При изменении кривизны фазового спектра происходит растяжка во времени исходного сигнала.

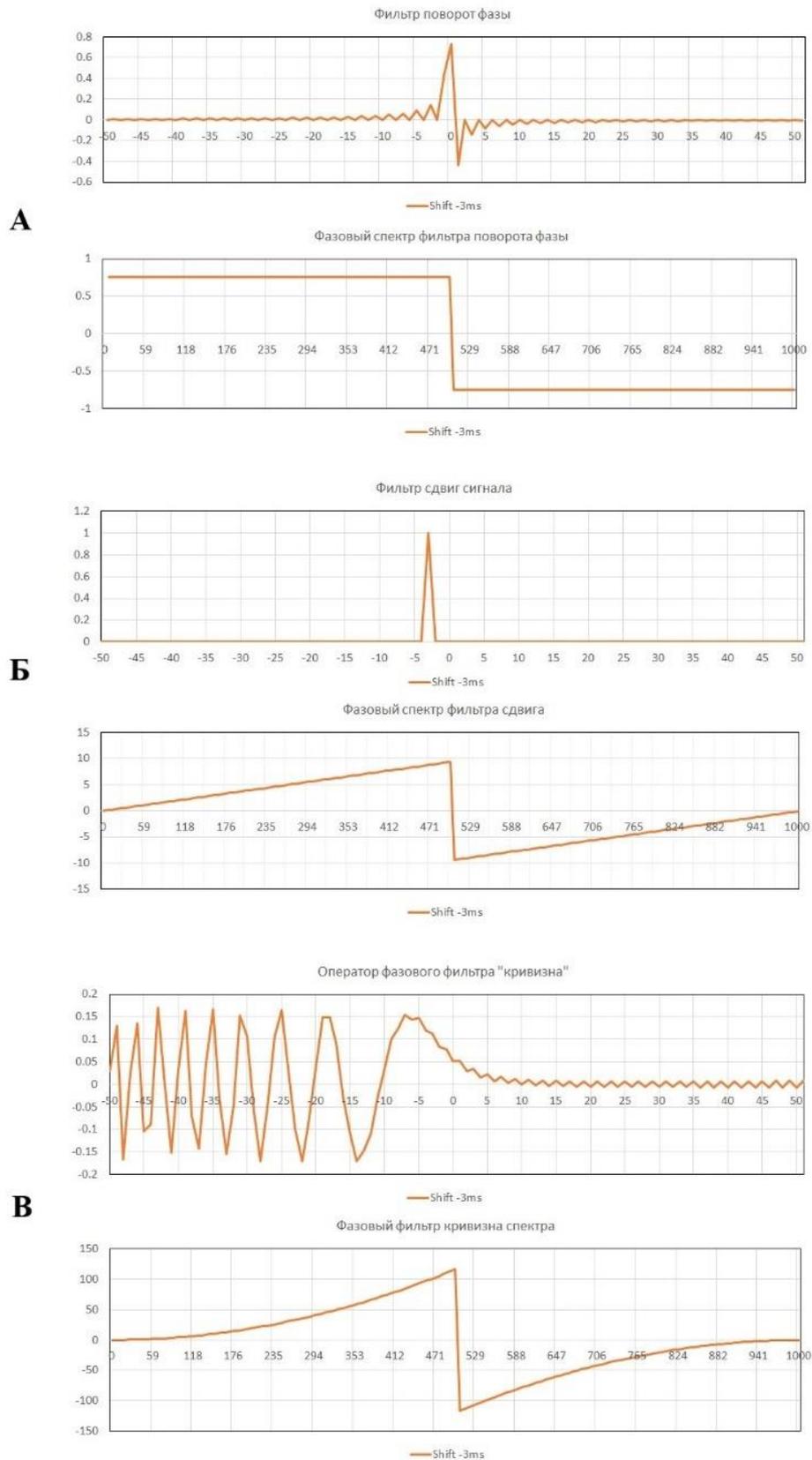


Рисунок 2.13. Операторы и спектры трех компонент фазового спектра, рассчитанные на сдвиг сигнала -3 мс.

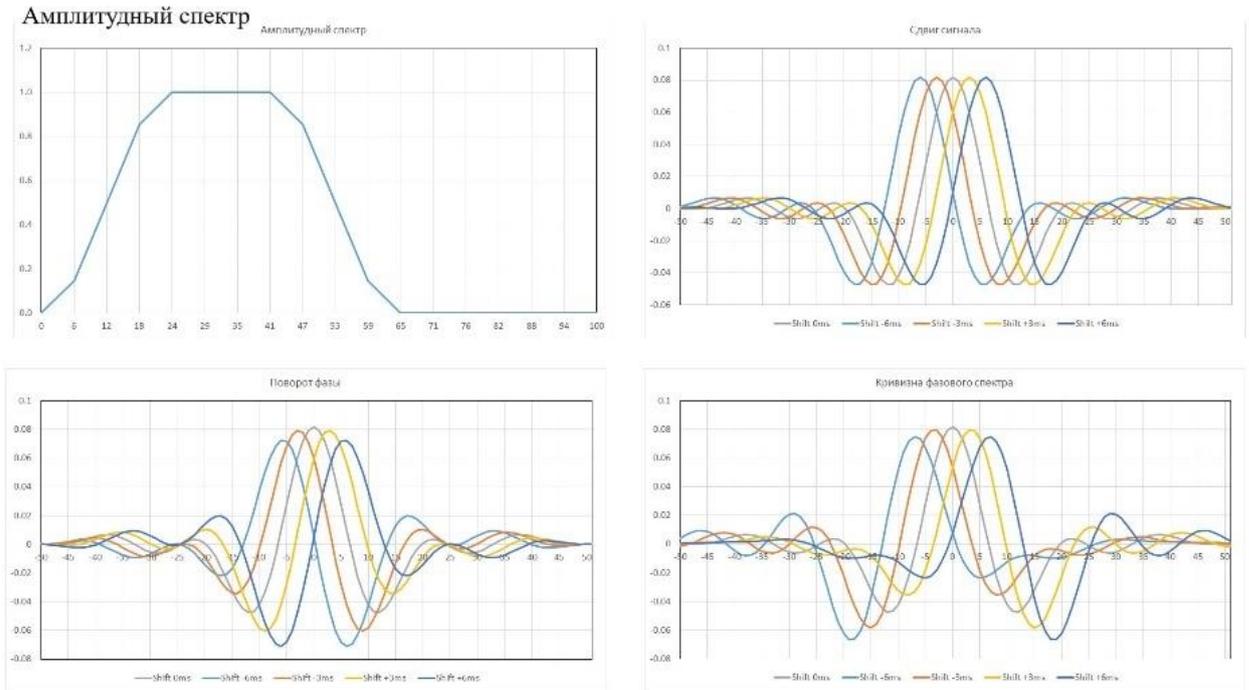


Рисунок 2.14. Примеры применения трех компонент фазовых фильтров, сдвигающих максимум сейсмического сигнала на различные временные интервалы.

## 2.4. Неоднозначность определения компонент фазового спектра

На рисунке 2.15. приведено сравнение операторов сдвига сигнала на 5 мс. При одинаковом сдвиге формы фильтрованных сигналов существенно различны. Интересно отметить, что применение операторов поворота и кривизны делает результирующий сигнал несимметричным.

Выполняя аппроксимацию фазового спектра, можно увидеть проблему неоднозначности выбора коэффициентов аппроксимирующих фильтров. Если спектр узкополосный, то при аппроксимации фазового спектра можно построить кривые, проходящие через фиксированную точку, положение которой может быть на частоте максимума спектра. И тогда значение фазы в этой точке будет вносить основной вклад в форму сигнала. На рисунке 2.16. приведены результаты применения фильтров к сейсмическому сигналу и фазовые спектры фильтров. При видимом различии фазовых спектров результаты применения фильтров очень похожи. Такой эффект обусловлен пересечением графиков фазовых спектров в

одной точке. В окрестности точки пересечения фазовые спектры почти не различаются между собой. И это совпадение происходит в частотном диапазоне, где амплитудный спектр сигнала имеет максимально большие амплитуды. Поэтому результаты фильтрации сигнала различными фазовыми фильтрами (рисунок 2.16.А) одинаковые.

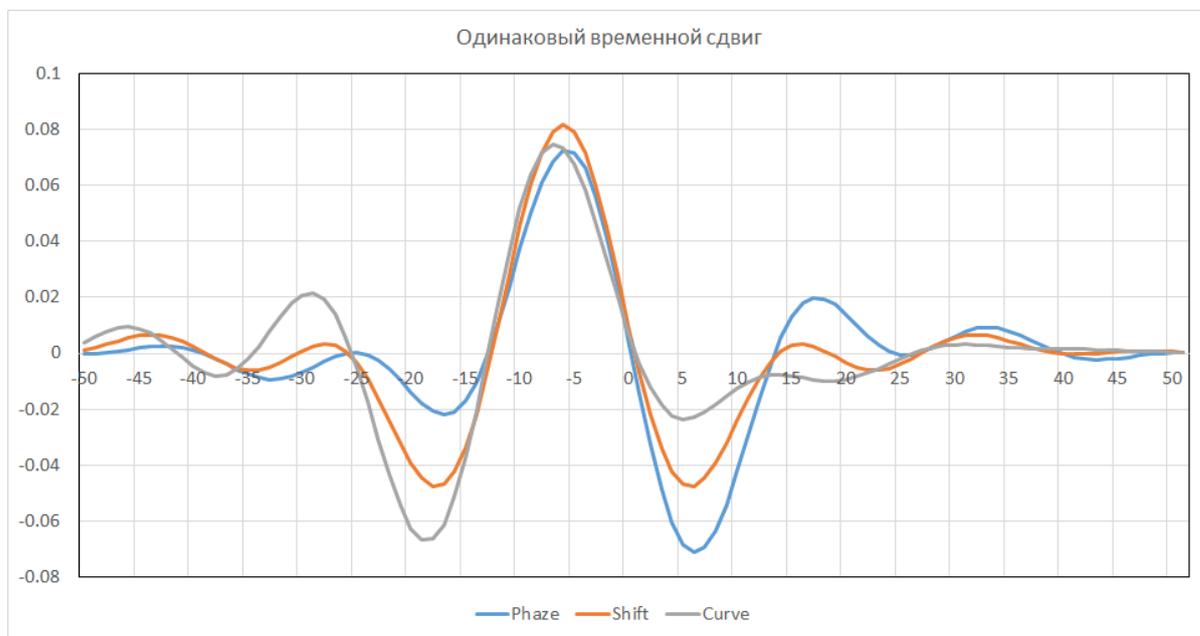


Рисунок 2.15. Пример выполнения сдвига исходного сигнала на 5мс, достигаемого применением различных компонент фазового фильтра.

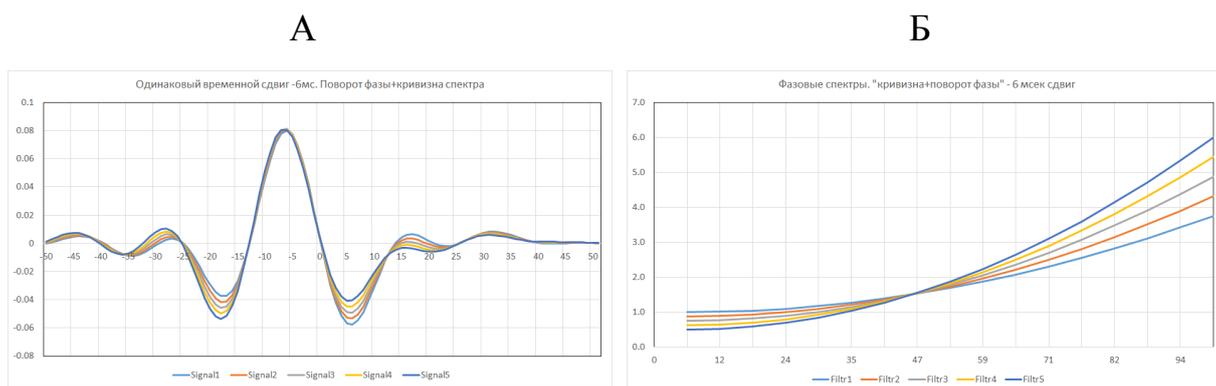


Рисунок 2.16. Семейство фазовых спектров фильтров, пересекающихся в одной точке со значением частоты 47Гц и результат применения фильтров к сигналу с видимой частотой 47Гц.

На рисунке 2.17. приведены операторы фильтров и их фазовые спектры, реализующие сдвиг фильтруемого сигнала на -6мс. Приводимые на рисунке фазовые фильтры получены при использовании двух компонент – поворота фазы и изменения кривизны. Применение операторов демонстрируется на рисунке 2.16.А. Видимая частота сигнала на рисунке равна 47 Гц. Изменение параметров фильтров рассчитано таким образом, что графики фазовых спектров пересекаются в одной точке с координатой 47 Гц. Значение фазового спектра в этой точке равно 1.77 рад ( $2*\pi*0.006$ ), что обеспечивает сдвиг сигнала на -6мс. Близость результатов фильтрации при применении различных фильтров подтверждает тот факт, что существенность различия операторов определяется только в том диапазоне частот, в котором амплитудный спектр фильтруемого сигнала имеет существенно большие значения. Из этого следует, что и определение компонент фазового спектра следует выполнять только в полезном диапазоне частот сейсмического сигнала. На рисунке 2.18. приведен пример фильтрации сигнала другим семейством фильтров. При задании семейства фазовых спектров можно фиксировать точку пересечения графиков фазового спектра, можно задать наклон прямой, которой должны касаться фазовые спектры. Графики семейства таких фильтров показаны на рисунке 2.18. Значение фазового спектра точке касания равно 1.77 рад ( $2*\pi*47*0.006$ ), что обеспечивает сдвиг сигнала на -6мс. Прямая, которой касаются все графики фазовых спектров, соответствует наклону фильтра, сдвигающего сигнал на -6мс. Результаты фильтрации сейсмического сигнала такими фильтрами очень близки между собой. Для практических данных при наличии помех существует некоторый диапазон значений эквивалентных параметров ( $\varphi$ ,  $\Delta t$ ,  $C$ ) фазовых фильтров. Эквивалентность следует понимать в том смысле, что применение фильтра с эквивалентными параметрами к сейсмическому сигналу дает одинаковый результат.

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 может быть обусловлена наличием помех и,

возможно, достаточно сложной формой сигнала (фазового спектра сигнала). На практике существование эквивалентных операторов не ограничивает практическое применение корректирующих фильтров. Так как мы видим, что после определения параметров фильтра и применения фильтра к данным результат фильтрации будет корректным. То есть таким же, как если бы мы применяли фильтр с другими эквивалентными параметрами. В то же время настройка фазовых фильтров на один сейсмический сигнал не дает возможности корректно использовать построенные фазовые фильтры к другому сигналу. Если амплитудные спектры сигналов меняются, должна выполняться перенастройка фазовых фильтров на новый сигнал.

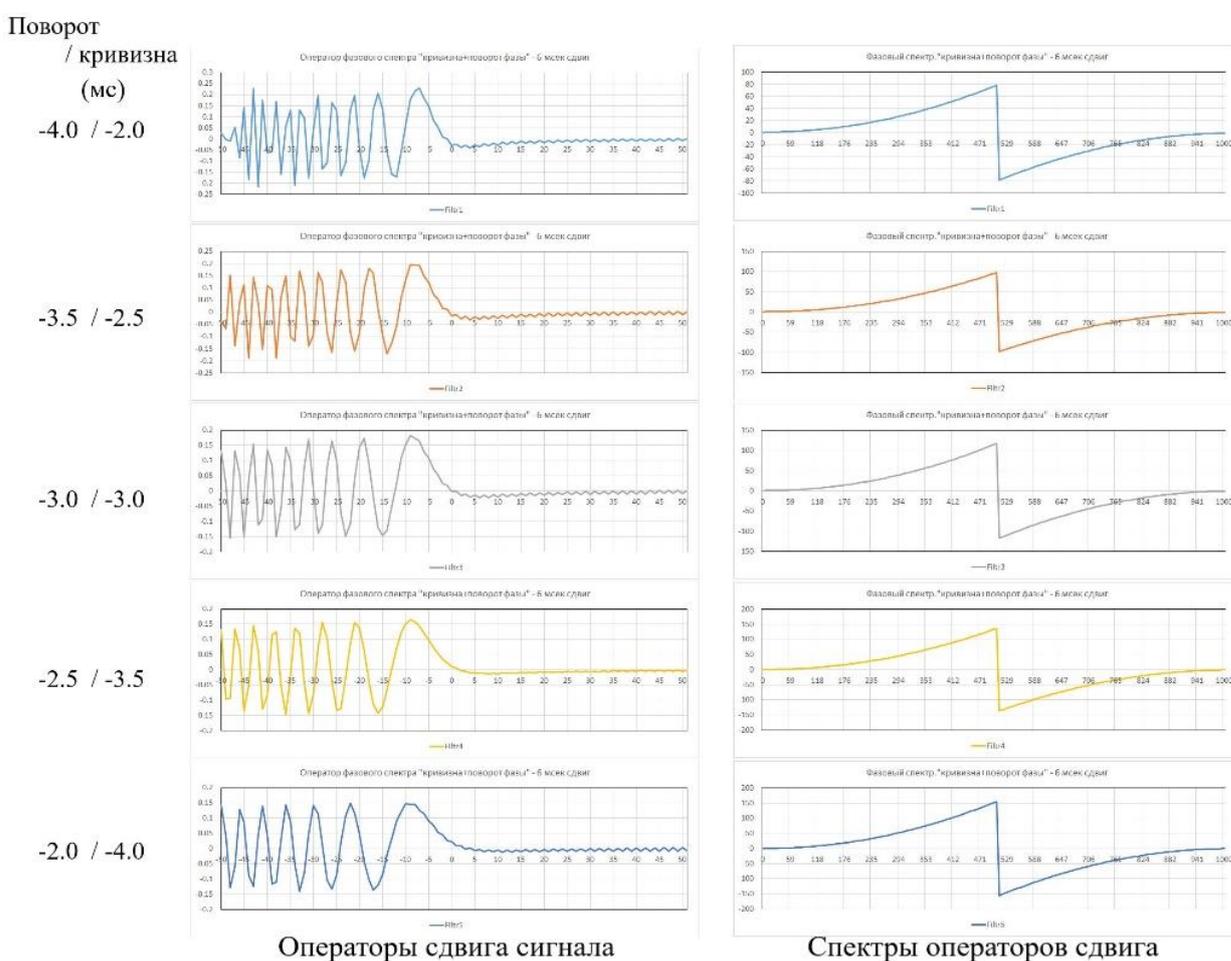
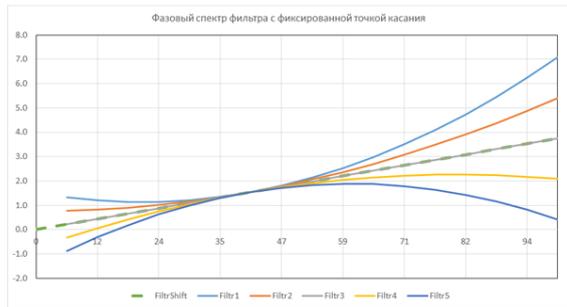
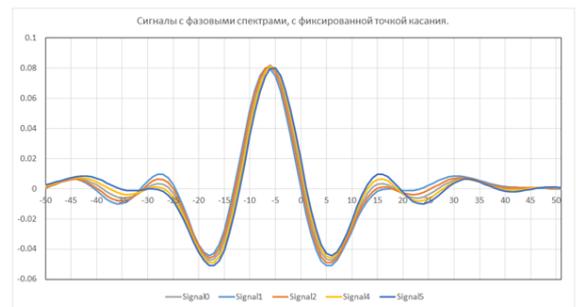


Рисунок 2.17. Операторы фильтров и фазовые их фазовые спектры. К расчету эквивалентных фильтров, выполняющих сдвиг фильтруемого сигнала на одну величину задержки (-6мс).



Фазовые спектры, рассчитанные так, что есть общая точка касания к линейному фильтру



Сигналы, рассчитанные так, что для фазовых спектров есть общая точка касания

Рисунок 2.18. Семейство фазовых спектров, имеющих общую касательную с наклоном ( $2 \cdot \pi \cdot f \cdot 0.006$  рад/Гц) и результаты применения фильтров.

## ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫБОРА ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ОЦЕНОК ИСКАЖЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ<sup>2</sup>

Определение амплитудных и фазовых компенсирующих фильтров выполняется путем применения метода подбора. Метод подбора оптимальных значений параметров фильтра может быть использован с помощью библиотечных научных функций, выполняющих сравнение двух сейсмических трасс или спектров с использованием различных алгоритмов оптимизации. В нашей работе использовались разработанные в «ПетроТрейс» модули в обрабатывающей системе ECHOS, которые используют математическую библиотеку IMSL. При использовании итеративного подбора параметров важным местом является задание меры сходства двух сейсмических трасс.

### 3.1. Использование различных мер сходства сейсмических сигналов

При стандартных подходах для параметрической оценки амплитудного и фазового спектра в целях оценки близости двух сигналов используется коэффициент корреляции

$$K(\tau, \varphi, cur) = \sum_{i=t1}^{t2} Tr1(i)(Tr2(i) * F(\tau, \varphi, cur)) \quad (17)$$

где значение корреляции  $K$ , зависит от сдвига  $\tau$  между двумя сейсмическими трассами, фазового поворота  $\varphi$  и  $cur$  – кривизны фазового спектра. Исходя из выполненных исследований было решено использовать методы подбора параметров во временной области, основываясь на результате применения амплитудных и фазовых фильтров к корректируемой трассе. Программа

---

<sup>2</sup> При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

1. **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).

оптимизации использует функцию взаимной корреляции и сравнивает две трассы: базовую (эталонную) и корректируемую трассу после применения к ней корректирующих фильтров. Меняя параметры корректирующих фильтров, находим оптимальный, при котором оценка корреляции будет наилучшей.

Для решения задачи поиска оптимальных параметров фильтра можно воспользоваться другими известными мерами сравнения сигналов. В качестве меры близости трасс можно предложить использовать, например, функционал:

$$R(\tau, \varphi, cur) = \sum_{i=t_1}^{t_2} |Tr1(i) - Tr2(i) * F(\tau, \varphi, cur)| \quad (18)$$

Данная оценка основана на вычислении модуля разности двух трасс.

В качестве меры сходства может быть использован нормированный коэффициент корреляции или NRMS (E. Kragh, P. Christie, 2002). Оценка NRMS оценивает различие двух сравниваемых и определяется по формуле:

$$NRMS = \frac{200 \times RMS(a_t - b_t)}{RMS(a_t) + RMS(b_t)} \quad (19)$$

$$RMS(x_t) = \sqrt{\frac{\sum_{t_1}^{t_2} (x_t)^2}{N}} \quad (20)$$

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. При таком подходе к сравнению минимальное значение NRMS определяет степень различия двух сравниваемых сейсмических сигналов. Если сигналы  $a(t)$  и  $b(t)$  совпадают, то значение NRMS равно нулю.

Выбор меры сходства не является простым и однозначным; вероятно, сделать выбор в пользу одного из подходов, на основе модельных данных затруднительно, так как все зависит от особенностей конкретного полевого материала.

Приведем простое сравнение двух мер близости сейсмических трасс: R и K. На рисунке 3.1. показаны карты параметров K и R в зависимости от фазы и сдвига.

Для оценки  $K$  максимум корреляции определяется взаимным сдвигом  $-3.5$  мс и поправкой за фазу  $-32^\circ$ . Для оценки  $R$  минимум оценки или наибольшая степень похожести двух трасс находится при параметрах: сдвиг  $0$  мс и фазовая поправка  $-6^\circ$ . Различие в оценках существенное. Вероятно, существует некоторое множество оценок, при которых трассы коррелируются хорошо, то есть похожи. Если выбрать локальные максимумы/минимумы поверхностей  $K$  и  $R$  (Рисунок 3.1.А и 3.1.В) и построить для них наборы скорректированных трасс, то можно видеть (Рисунок 3.1.С и 3.1.Е), что трассы в наборах очень похожи между собой. На рисунке 3.1.Д представлено несколько трасс с разреза ОГТ. К центральной трассе этого фрагмента и приводилась трасса коридорного суммирования. Процесс приведения состоял в сдвиге и коррекции фазового поворота.

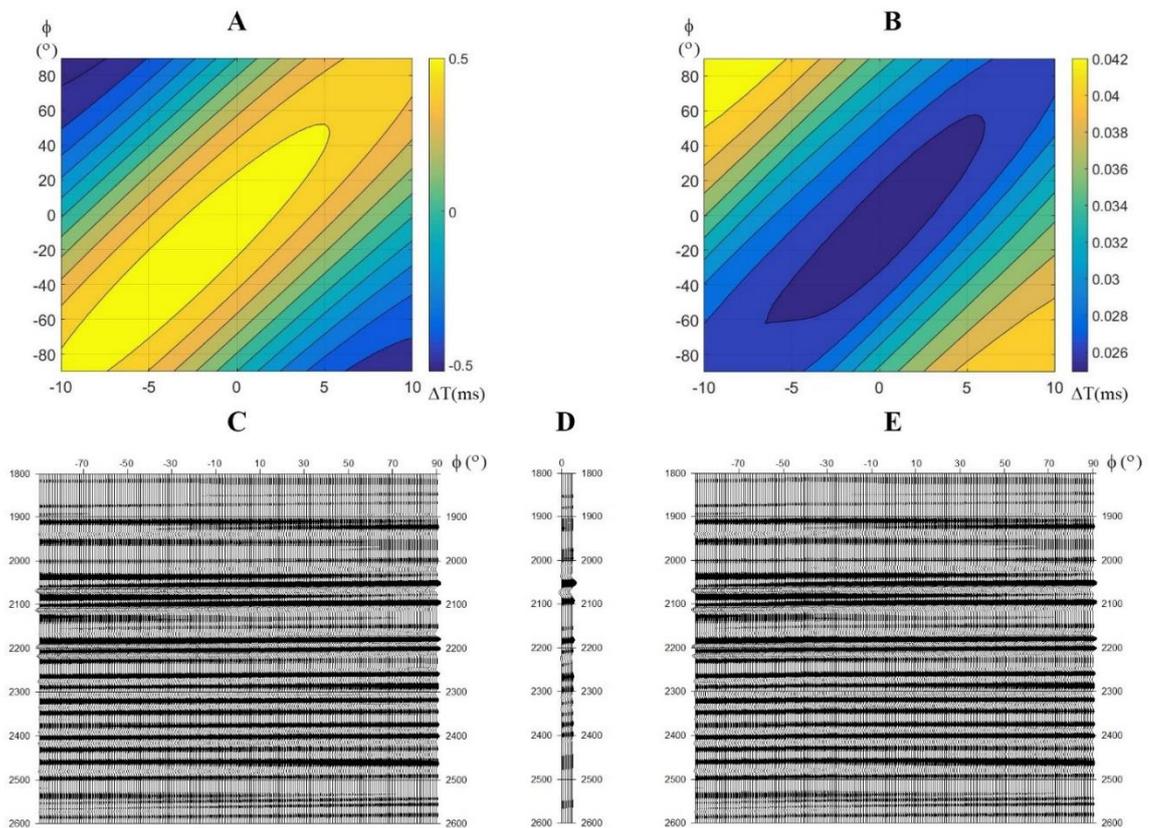


Рисунок 3.1. Поверхности коэффициента корреляции ( $K$ ) и оценки различия трасс ( $R$ ) при сопоставлении трассы коридорного суммирования и трассы разреза ОГТ. А – поверхность  $K$ ; В – поверхность  $R$ ; С и Е – наиболее близкие трассы к трассе разреза ОГТ (D) с параметрами, выбранными по локальным экстремумам сечений поверхностей  $K$  и  $R$ ;

Для того чтобы понять, почему все трассы с различными значениями (сдвиг, фазовая поправка) похожи между собой, рассмотрим фазовые характеристики корректирующих фильтров. Паре (сдвиг, фазовая поправка) соответствует некоторый фазовый фильтр. Причем фазовый сдвиг в спектральной области определяет общее постоянное значение фазового спектра. Сдвиг сигнала во времени соответствует линейному в спектральной области фазовому фильтру. При котором наклон фазового спектра пропорционален временному сдвигу. Таким образом, пара значений (временной сдвиг + фазовая поправка) определяет некоторую прямую на плоскости (частота, фаза). На рисунке 3.2.C и 3.2.D представлены пучки прямых (фазовые спектры), для которых характерно, что существует некоторая область, где все прямые пересекаются. Для прямых на рисунке 3.2.C пересечение более плотное. На Рис 3.2.D область пересечения прямых несколько размазана по горизонтали. Под фазовыми характеристиками фильтров приведены амплитудные спектры. Горизонтальный масштаб данных графиков один и тот же. Для фазовых характеристик (Рисунок 3.2.C и 3.2.D) горизонтальная ось подписана в радианах, для амплитудных спектров подписаны даны в значениях частоты. Характерно то, что прямые пересекаются (сходятся) в той области, где амплитудный спектр имеет наибольшие значения. Это объясняется тем, что для того, чтобы трассы были близки друг к другу, требуется совпадение фазового сдвига для видимой (средней) частоты сейсмического сигнала.

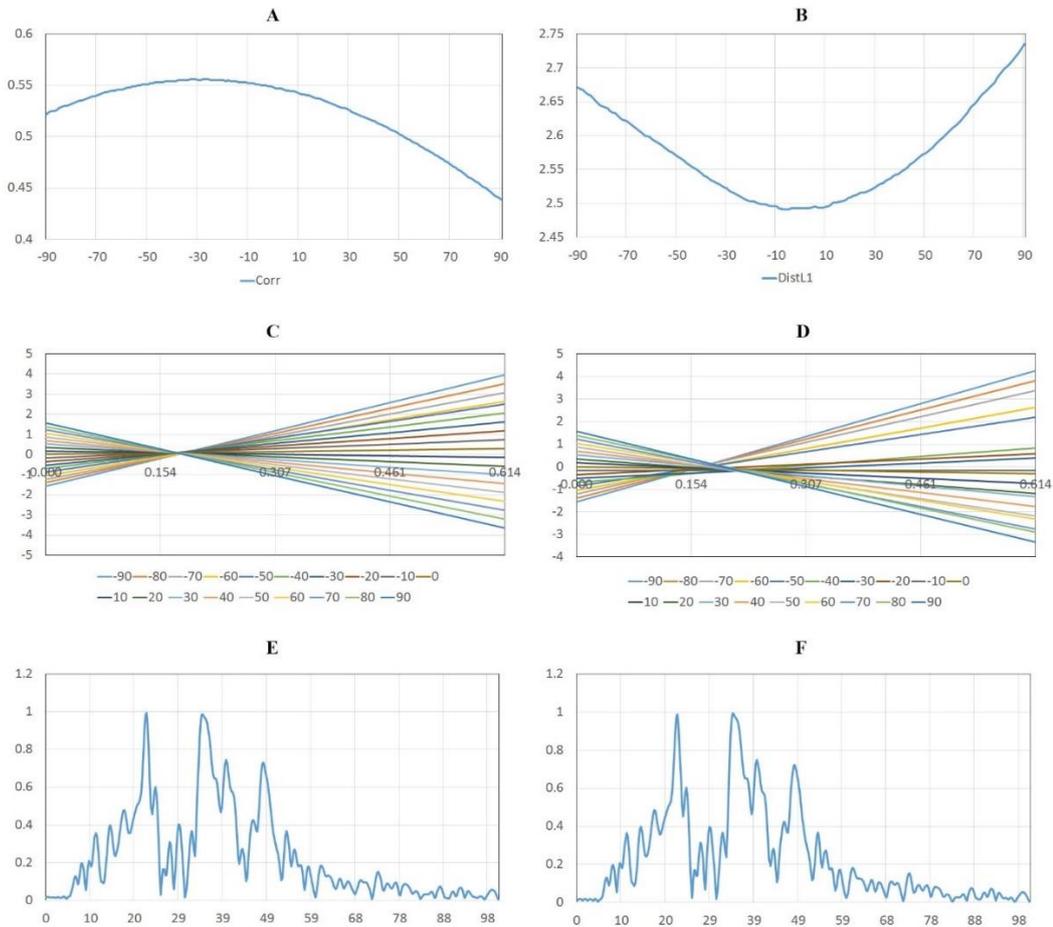


Рисунок 3.2. Построение множества фазовых характеристик, для фильтров, приводящих трассу коридорной суммы к трассе временного разреза ОГТ. А – кривая коэффициента корреляции  $K$ , В – кривая параметра  $R$  (рисунок 3.1). С, D – множество фазовых характеристик фильтров, каждый из которых параметризован двумя числами (сдвиг, поворот фазы). Е и F амплитудные спектры.

Анализ рисунка 3.2. показывает, что различие в мерах  $K$  и  $R$  не очень существенно, но влияет на результат подбора фазового фильтра. Для сравнения на рисунке 3.2. были выбраны трассы, у которых амплитудный спектр имеет несколько локальных максимумов на частотах 20, 40 и 50 Гц. Для корреляционной оценки  $K$  работает общая энергетическая оценка расстояния, и поэтому все возможные прямые (спектры фазовых фильтров) пересекаются в одной точке. Мера  $R$  менее устойчивая, и для различных спектральных диапазонов прямые (спектры фазовых фильтров) пересекаются в различных точках. Точки пересечения

определяются положением локальных максимумов. Хотя, как можно видеть на Рис.3.1.А и Б, положения глобальных экстремумов на картах близки.

Для того чтобы провести сравнение различных мер, используемых для подбора обратных фильтров, выполним эксперимент. Зададим в качестве исходного сигнала оператор полосового фильтра (0,5,120,150). Применим к заданному полосовому сигналу Q-фильтр с параметром ( $Q=75$ ) в диапазоне частот (20,40,70,90). Будем сравнивать два рассчитанных сигнала (оператора) полагая, что второй сигнал искажен и требуется найти фильтр, компенсирующий искажения. Оба сигнала представлены на рисунке 3.3. Для тестирования будем применять обратные фильтры, изменяя параметры Q обратных фильтров от -25 до -125. На Рис 3.4. представлены результаты обратной фильтрации для трех различных значений Q (-35, -75,-115). На графиках желтой линией показан исходный сигнал Signal1. На графиках сигналов видно, что при равенстве параметра обратного фильтра -75 результат восстановления совпадает с исходным сигналом.

Расчет различных мер сходства сигналов показан на рисунке 3.5. Естественно, что на модельном примере глобальный минимум всех графиков (различных мер) одинаков и равен -75, что точно соответствует значению Q, вводимому в исходный сигнал в качестве искажения. С точки зрения поведения графиков различных мер, нельзя выбрать наилучшую меру сходства. Поэтому при применении на реальных данных отдадим предпочтение квадратичным оценкам Рис3.5.В – сумма квадратов разности и Рис.3.5.Г NRMS. Как правило, квадратичные оценки более устойчивы для данных с помехами.

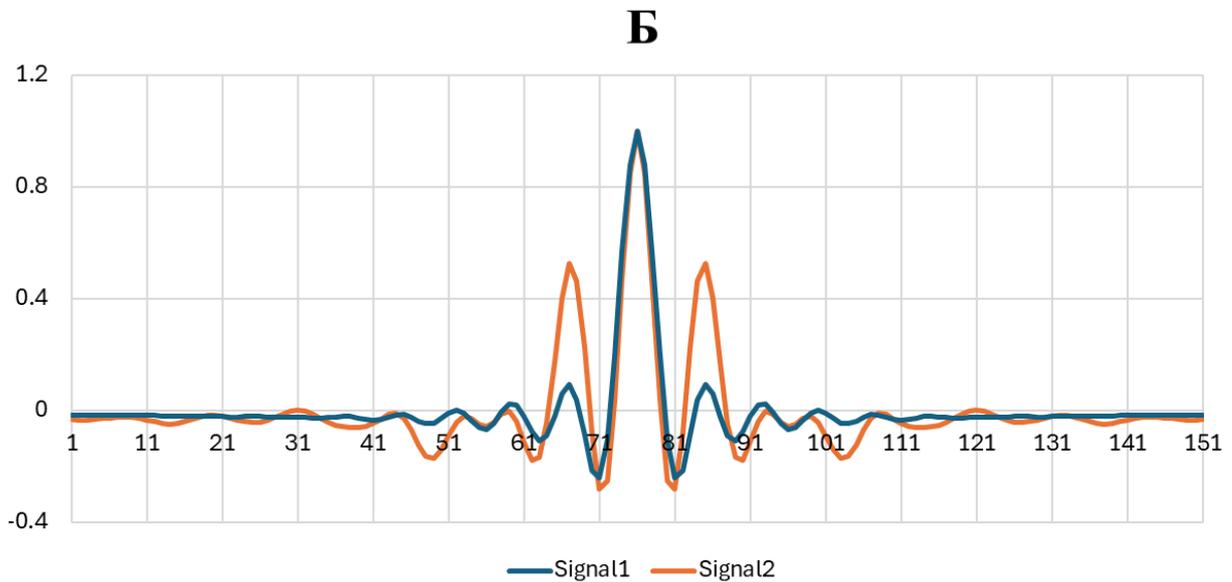
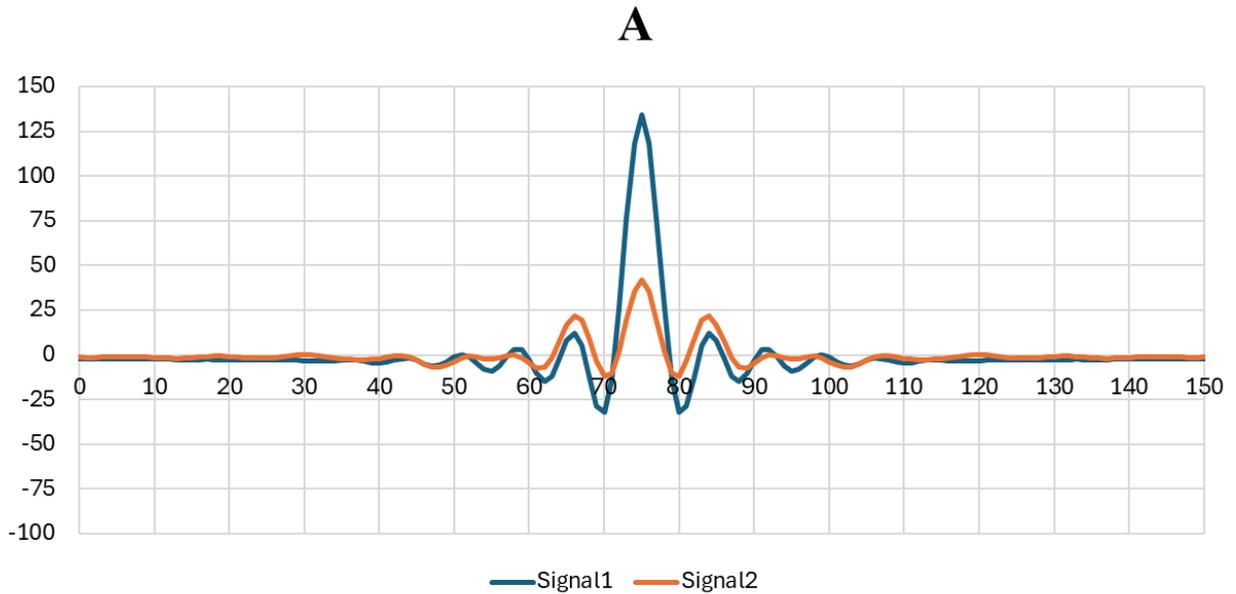


Рисунок 3.3. Два сигнала, используемые при тестировании различных критериев подбора параметра  $Q$  корректирующего фильтра. (А – без нормировки, Б – после нормировки). Signal1 – сигнал полосового фильтра с равномерным спектром в диапазоне частот (0,5,120,150); Signal2 – полосовой фильтр после искажения корректирующим фильтром ( $Q=75$ ), примененным в диапазоне частот (20,40,70,90).

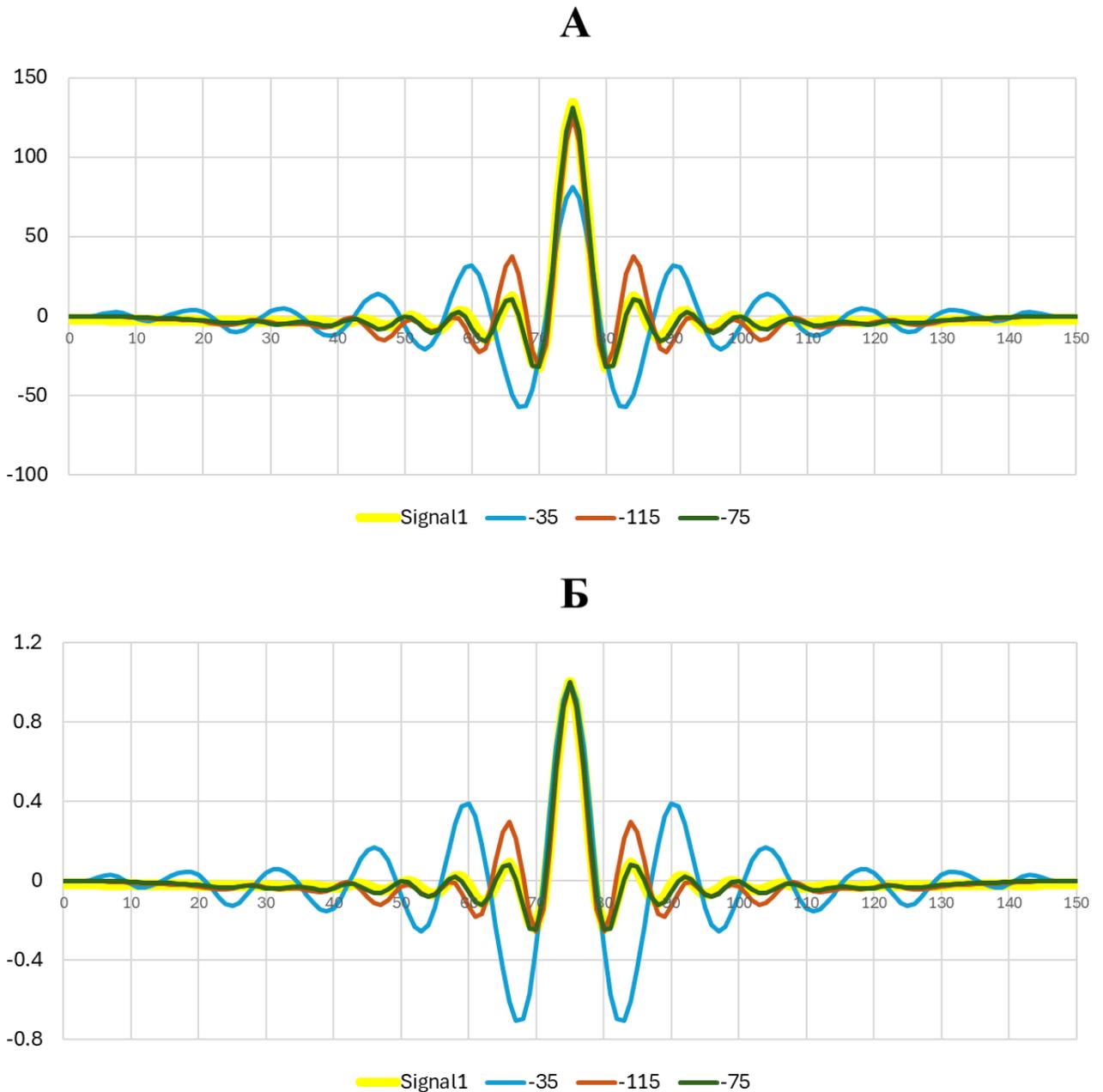


Рисунок 3.4. Подбора параметра  $Q$  корректирующего фильтра, применяемого к Signal2. (А – без нормировки, Б – после нормировки). Signal1 – сигнал полосового фильтра с равномерным спектром в диапазоне частот (0,5,120,150); Signal2 после восстановления корректирующими фильтрами, примененными в диапазоне частот (20,40,70,90). Индексы кривых, соответствуют параметру фильтрации  $Q=(-35;-75,-115)$ .

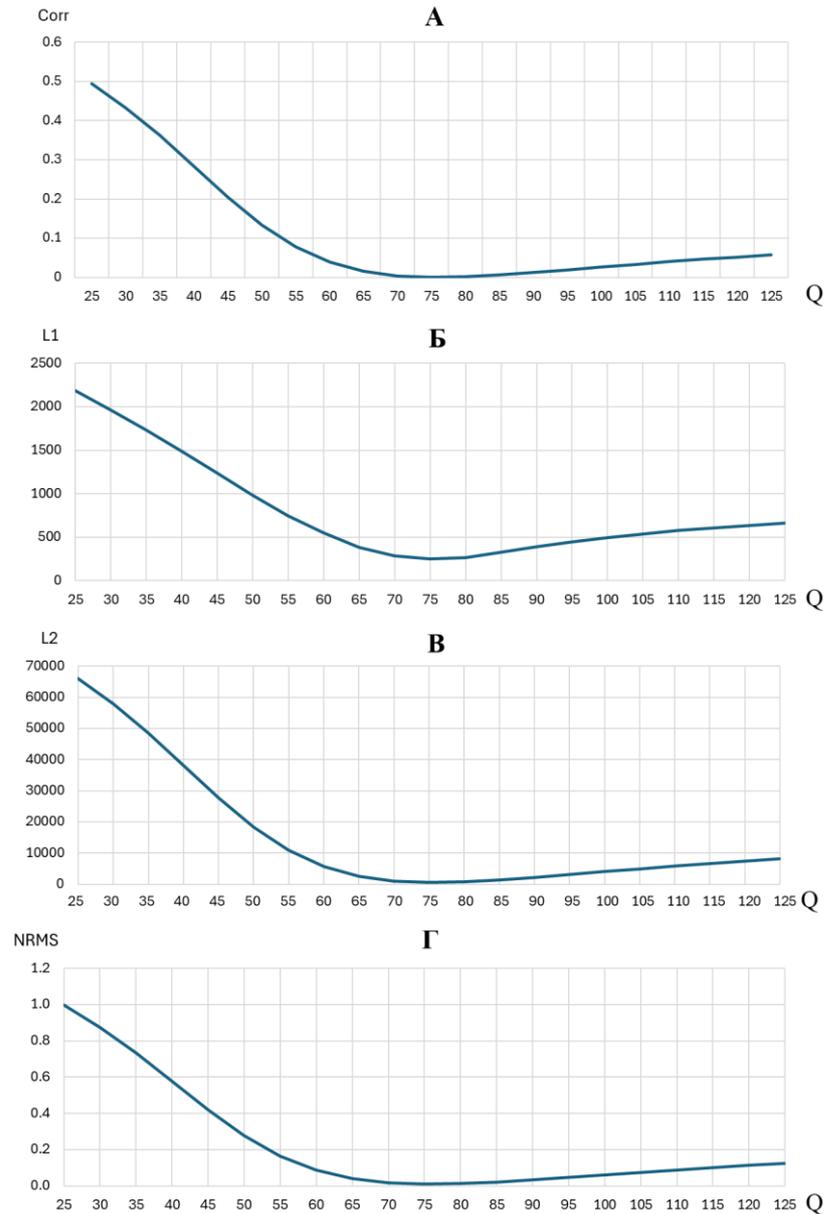


Рисунок 3.5. К выбору меры различия сигналов при подборе параметра  $Q$  корректирующего фильтра. А – нормированный коэффициент корреляции; Б – сумма абсолютных значений разности; В – сумма квадратов разности; Г – NRMS.

### 3.2. 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. Теоретически выбор

частотного диапазона для построения амплитудных и частотных фильтров коррекции тоже может быть автоматизирован на основе нейронных сетей и алгоритмов обучения. Но, как правило, геофизический контроль обработки более надежно позволяет избежать ошибок в выборе диапазона частот для сравнения и коррекции сейсмических записей. 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. Возможность использования сглаживания определяемых параметров корректирующих фильтров.

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

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

## ГЛАВА 4. МЕТОДЫ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО УЧЕТА И КОМПЕНСАЦИИ ИСКАЖЕНИЙ СИГНАЛОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ<sup>3</sup>

### 4.1. Поиск корректирующего фильтра, приводящего форму сигнала источника на данных 2D к сигналу, полученному при работах 3D

Для коррекции 2D данных и приведения формы сейсмического сигнала на данных 2D к форме сигнала на данных 3D было выполнено тестирование различных подходов. Для сравнения и расчета операторов фильтров были выбраны фрагменты данных до деконволюции. При одинаковом положении координат ОГТ данные 3D и 2D имели разную кратность и различную кинематику на сейсмограммах. Поэтому для сравнения двух наборов данных был выполнен ввод кинематики и суммирование. Для суммы использовались небольшие удаления на сейсмограммах ОГТ. Такая процедура позволила получить некоторые суммарные трассы, в которые был внесен минимум искажений, связанных с растяжкой сигналов при вводе кинематики.

На рисунках 4.1.A и B показаны данные, которые использовались для получения корректирующих фильтров. Анализ и построение фильтров выполнялся в окне 300–1600 мс. Первым шагом сопоставления данных был выбор сдвига трасс и угла поворота фазы сейсмического сигнала. Для этого для каждой пары трасс строилось распределение специальной оценки  $R$  в зависимости от временного ( $\Delta t$ ) и фазового сдвига ( $\Delta \phi$ ). Оценка близости трасс определяется по формуле NRMS. Оценка NRMS достигает минимума, если трассы похожи, и равна нулю, если трассы равны. Принцип поиска оптимальных параметров сдвига и поворота ( $\Delta t, \Delta \phi$ ) сводился к перебору возможных значений и поиска минимума меры близости  $R$ . То

---

<sup>3</sup> При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

1. **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).

есть для пары трасс вводятся различные значения  $(\Delta t, \Delta \varphi)$  и ищется та пара величин, при которой значение NRMS минимально. Все 15 значений, полученных для каждой пары трасс, вынесены на график (Рисунок 4.2). На графике показано положение средней точки, характеризующей некоторое общее различие между наблюдаемыми данными. Среднее значение поворота фазового спектра для сравниваемых данных близко к  $80^\circ$ .

Для того чтобы уменьшить случайный разброс определяемых параметров, мы использовали подход, в котором параметры  $(\Delta t, \Delta \varphi)$  определялись одновременно на базе 6 трасс. На рисунке 4.3. показана карта параметра NRMS в зависимости от параметров сдвига фазы и сдвига по времени. Для оценки R наилучшая степень похожести определяется при параметрах: сдвиг  $\Delta t = -2$  мс и фазовая поправка  $\Delta \varphi = 80^\circ$ . Фазовая коррекция на  $80^\circ$  позволяет изменить рисунок записи данных 2D и приблизить форму сигнала к форме, наблюдаемой на данных 3D.

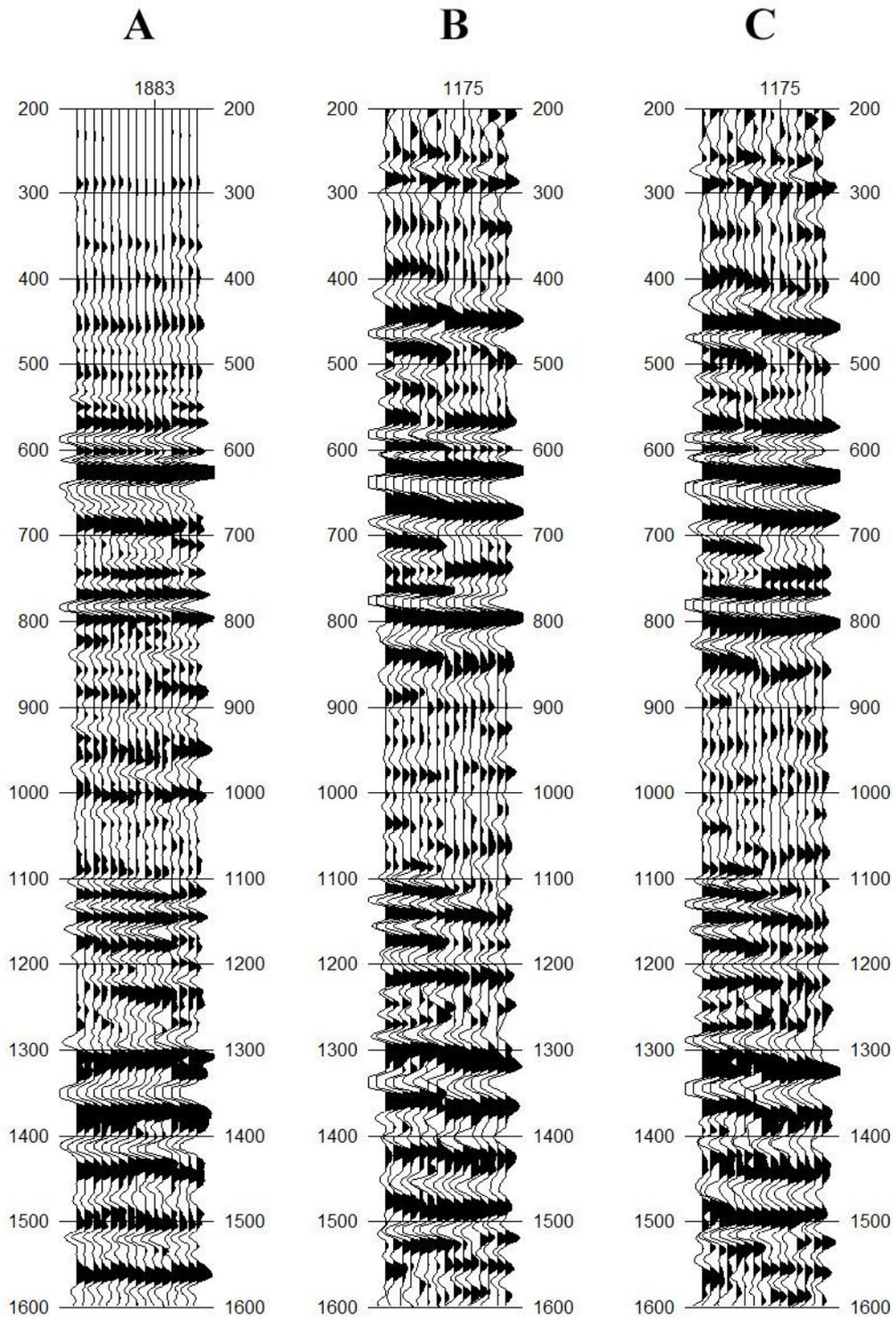


Рисунок 4.1. Наборы трасс, использовавшиеся для согласования сейсмических данных 3D (A) и 2D (B). Результат коррекции данных 2D к набору данных 3D представлен на фрагменте C.

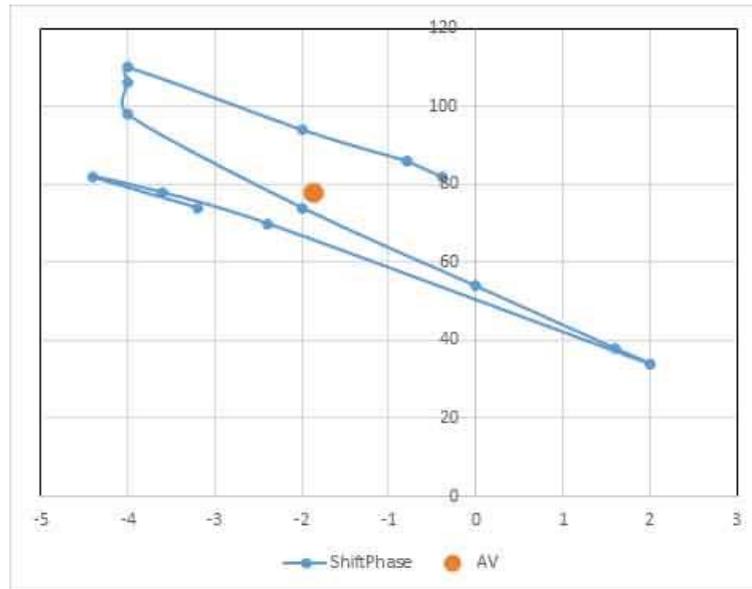


Рисунок 4.2. Определение среднего значения сдвига и фазового поворота для 15 трасс, сравниваемых данных (взрывов и вибрационной съемки).

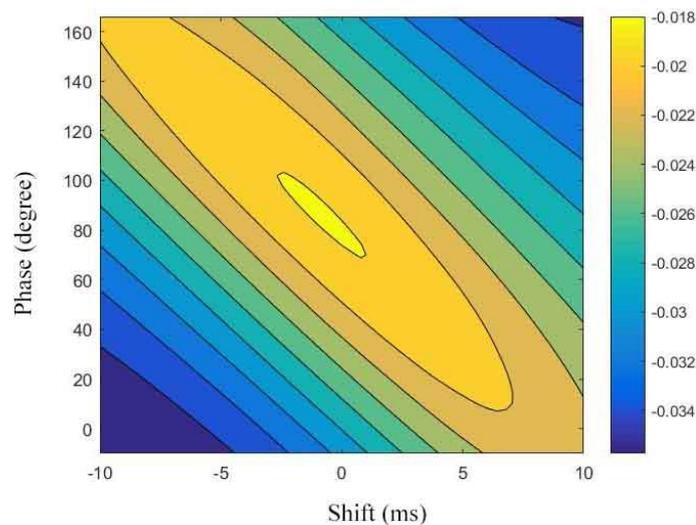


Рисунок 4.3. Распределение параметров сдвига и фазового поворота при сравнении данных со взрывами и вибрационных. База анализа 6 трасс. Трасса №3.

Коррекцию фазового спектра можно улучшить, если добавить еще один тестируемый параметр и определять фазовый фильтр тремя числами ( $\Delta t, \Delta \varphi, \Delta C$ ). Таким образом, фазовый спектр фильтра будет описываться постоянной величиной  $-\Delta \varphi$ , наклоном  $\Delta t$  и новым параметром  $\Delta C$  – который характеризует кривизну фазового спектра. На рисунке 4.4. показано сравнение 2х параметрической (C) и

трехпараметрической (D) коррекции данных 2D. На указанных фрагментах достаточно сложно однозначно сказать, что трехпараметрическая коррекция сработала лучше. После трехпараметрической коррекции видны небольшие локальные улучшения прослеживаемости осей синфазности.

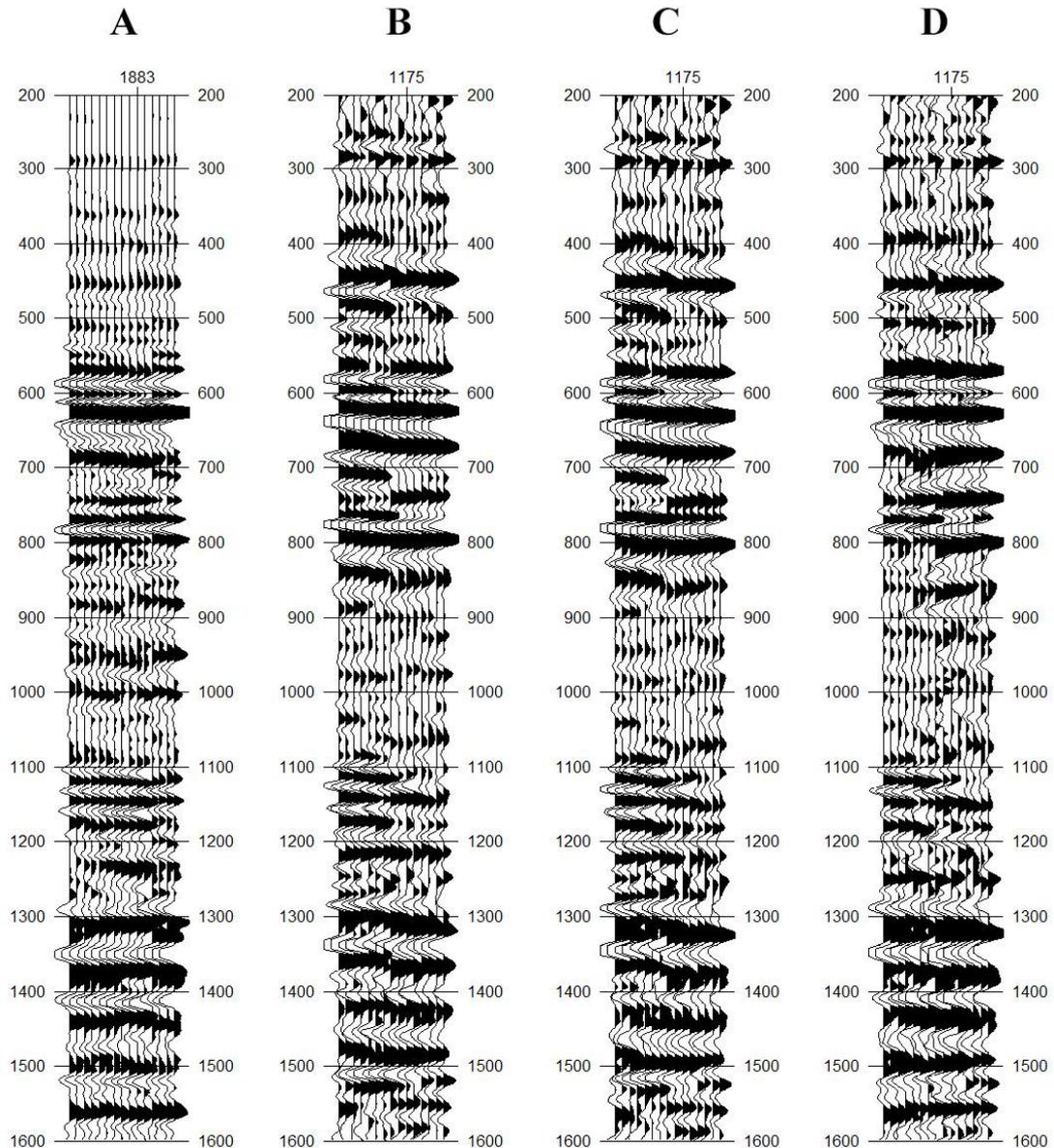


Рисунок 4.4. Наборы трасс, использовавшиеся для фазовой коррекции сейсмических данных 2D (B) к данным 3D (A). C – результат двухпараметрической коррекции данных 2D к набору данных 3D. D – результат трехпараметрической коррекции фазового спектра.

## 4.2. Определение поглощения по данным ВСП

Проверим использование параметрической коррекции сигналов на стандартной задаче получения оценок параметра поглощения по амплитудным спектрам ВСП. На рисунке 4.5.А приведено поле падающей волны, которую будем использовать для анализа, а на фрагменте Б – спектры падающей волны. График добротности (рисунок 4.5.) был рассчитан стандартным подходом в отношении логарифмических спектров. График представляет среднее значение параметра добротности, рассчитанное для каждого приемника (каждой трассы падающей волны) по отношению к первому, верхнему сейсмоприемнику. Расчет линейного коэффициента наклона отношения спектров выполнялся в частотном диапазоне от 15 Гц до 45Гц. По графику Q видно, что оценка параметра увеличивается с глубиной от значений 60 до 120. В целом это показывает, что серьёзных отклонений поглощения в пластах не наблюдается. Неустойчивость оценок в основном обусловлена наличием помех и искажений в форме падающей волны.

Применение полосовых параметрических фильтров Q выполнялось для падающих волн в диапазоне 10–80 Гц. Выборочные спектры падающей волны, по которым выполнялся расчет, приведены на рисунке 4.6. в логарифмическом масштабе и рисунке 4.7. в линейном масштабе. Для каждого из спектров приведены результаты коррекции спектров сигналов по отношению к базовому сейсмоприемнику (рисунок 4.8.). Подобранные значения добротности Q выводились на график и использовались для выполнения коррекции сигнала.

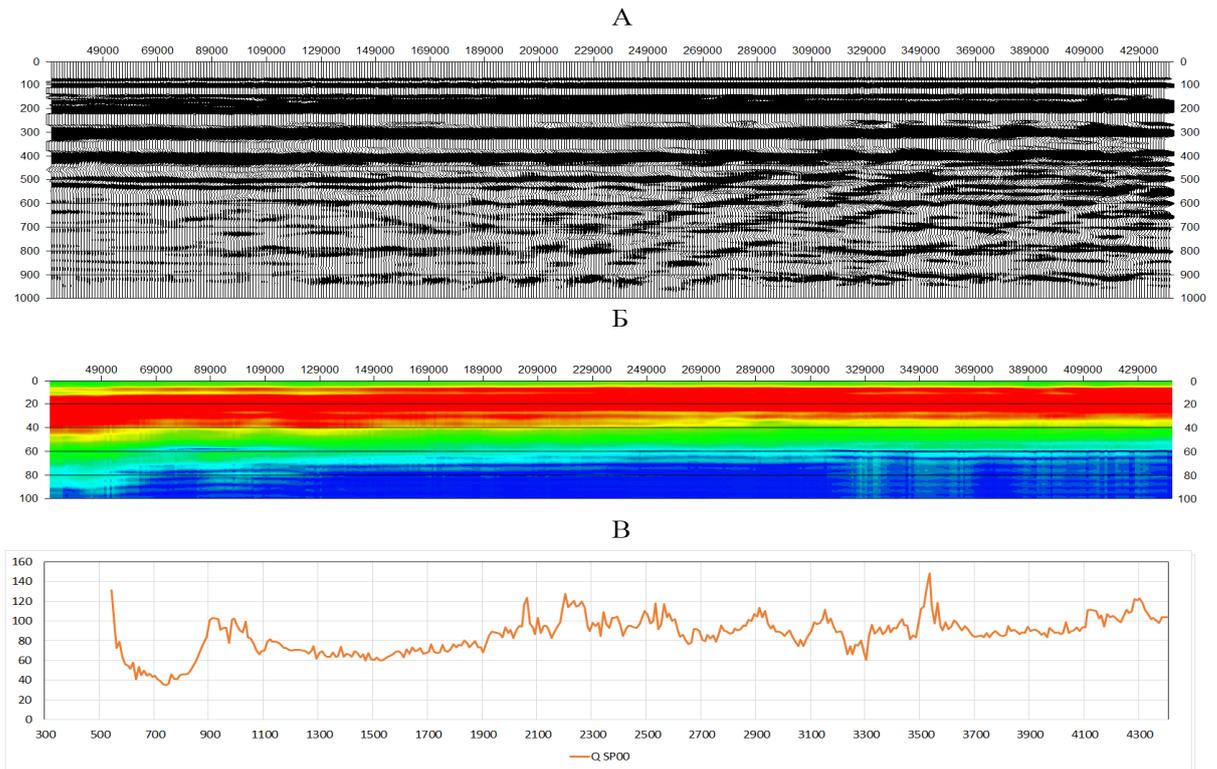


Рисунок 4.5. Расчет графика добротности методом отношения логарифмов спектра. А – поле падающих волн, Б – спектры падающей волны. В – Добротность – параметр  $Q$ , оцененный как среднее значение относительно первой трассы (с фрагмента А).

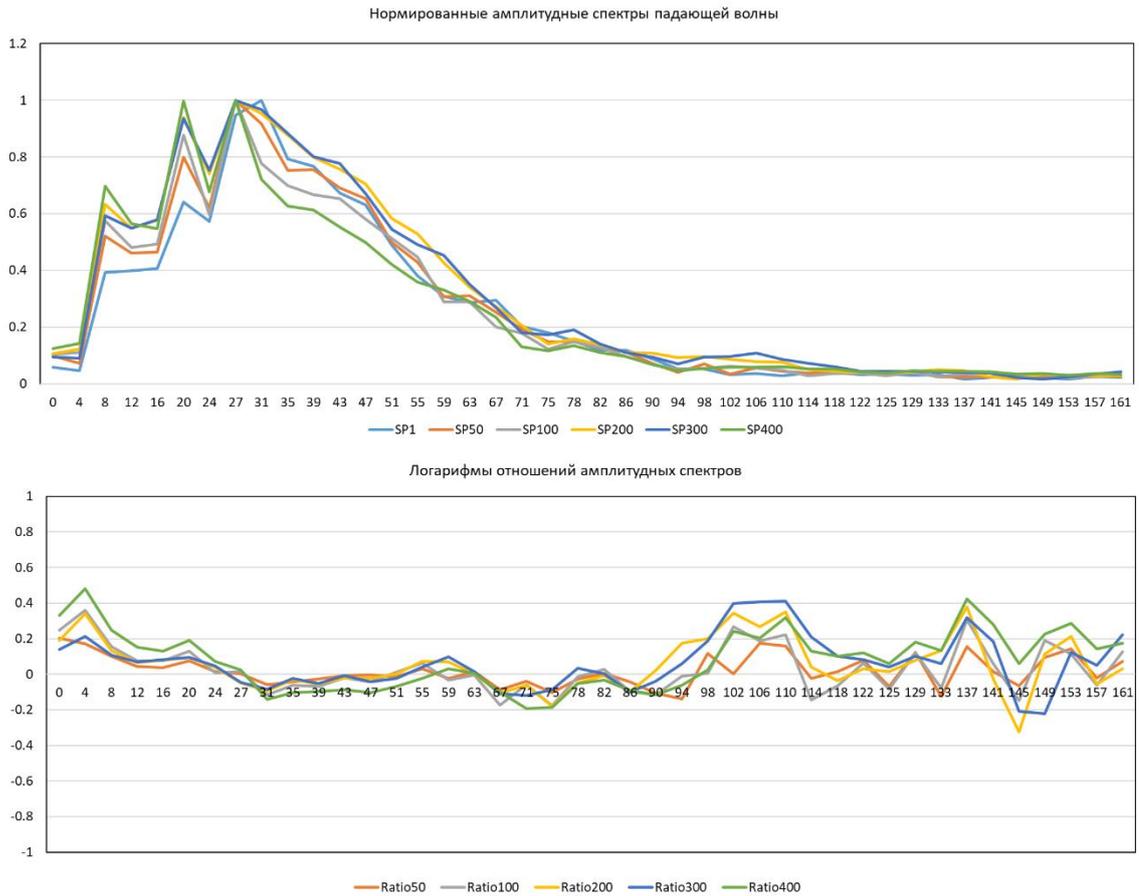


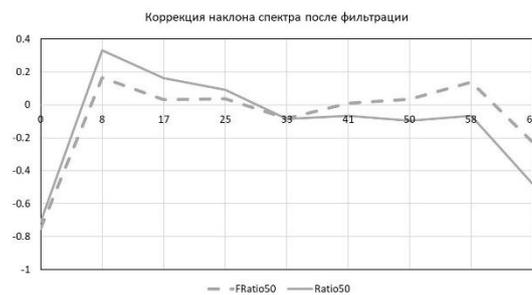
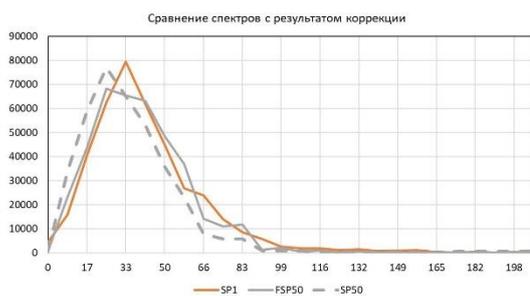
Рисунок 4.6. Выборочные логарифмические спектры падающей волны и отношения логарифмических спектров, рассчитанные по отношению к сигналу с верхнего сейсмоприемника.



Рисунок 4.7. Спектры сигналов падающей волны, которые сравниваются со спектром первого сигнала.

На рисунке 4.8 приведено сравнение спектров первого и текущего приемников. Для расчета и компенсации поглощения был выбран диапазон построения тестовых фильтров 10–80Гц. В этом диапазоне частот рассчитывались компенсирующие фильтры, и соответствующая трасса падающей волны фильтровалась. Результат фильтрации сравнивался с помощью оценки NRMS с сигналом с опорной трассы (SP1). Минимальное значение NRMS было достигнуто для фильтрованных трасс, спектры которых изображаются на рисунке пунктирной линией.

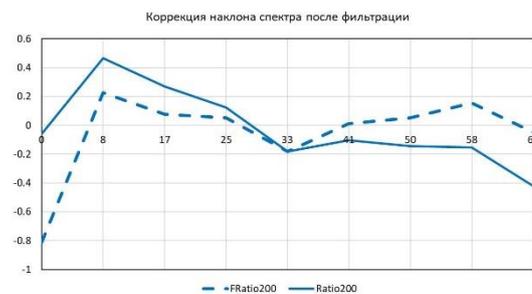
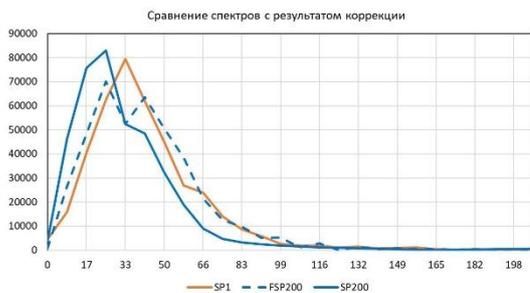
## Глубина 500 м



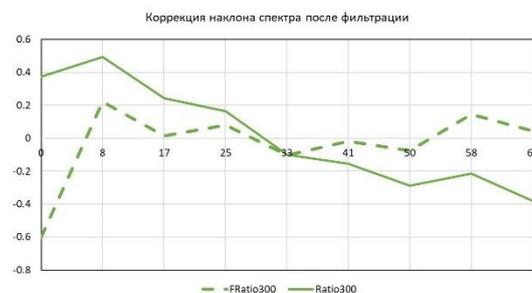
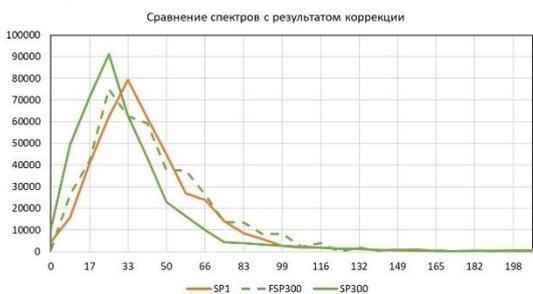
## Глубина 1000м



## Глубина 2000м



## Глубина 3000м



## Глубина 4000м

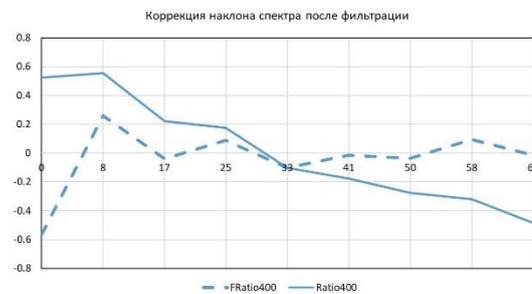
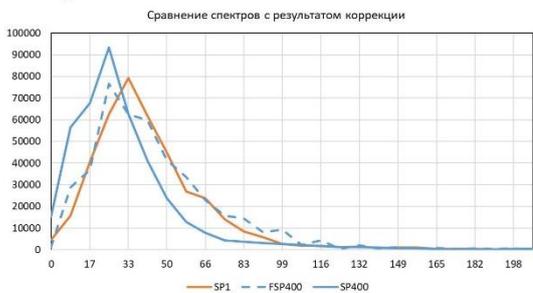


Рисунок 4.8. Пример расчета параметра  $Q$ , компенсирующего наклон отношения логарифмических спектров в диапазоне частот 10–80Гц.

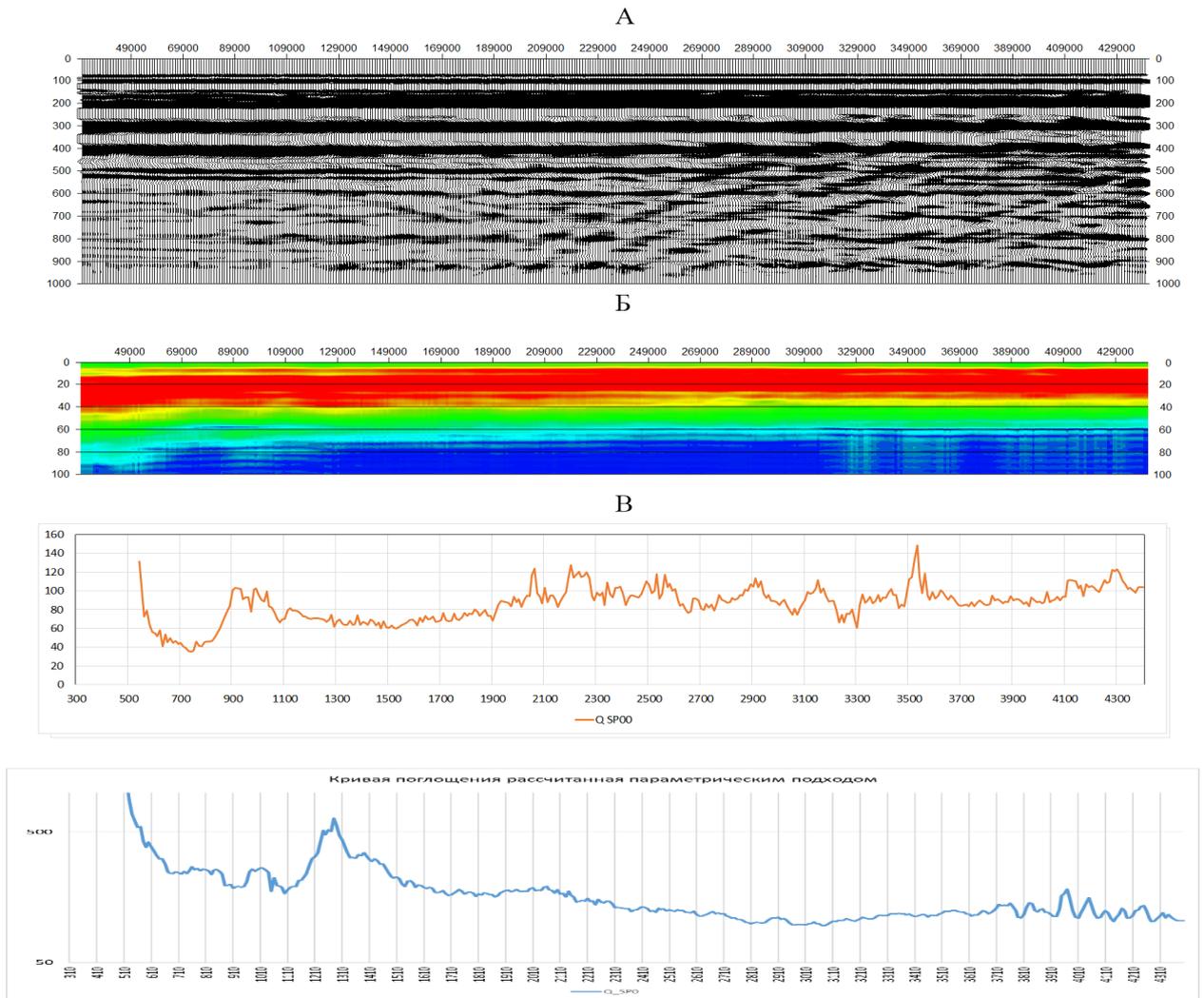


Рисунок 4.9. А – поле падающих волн, Б – спектры падающей волны. В – Добротность – параметр  $Q$ , оцененный как среднее значение относительно первой трассы (с фрагмента А). Синяя кривая – Новый график без учета временного множителя при расчете параметра  $Q$ .

Результат коррекции и расчета параметра  $Q$  (Рисунок 4.9.) можно считать успешным. На рисунке 4.8. видно, что спектр исходной трассы скорректирован и наклон отношения спектров близок к нулю, что указывает на сходство спектров исходного и скорректированного сигнала в области восстанавливаемых частот (10–80 Гц). При выполнении подбора параметра поглощения (добротности  $Q$ ) коррекция выполняется относительно некоторого положения первой трассы. В нашем примере – это спектр трассы SP1, обозначенный на рисунке коричневым цветом. Базовый спектр не является идеальным, обеспечивающим максимальную разрешенность записи, так как зарегистрированный сигнал изменен за счет условий

возбуждения и прохождения по ВЧР. Поэтому наши определенные значения  $Q$  ( $SPP1 - SPi$ ) характеризуют только изменения спектров по отношению к базовому спектру ( $SP1$ ).

### 4.3. 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., Zhukov 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 10–100 Гц. При этом начальное и конечное изменение амплитуды свипа происходит за 0.1 с. 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 4.10.А 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 рисунке 4.10.А. На рисунке 4.10.Б показаны амплитудные спектры базового свипа (красный график) и амплитудный спектр свипа с искажениями (черный график). Сравнение показывает существенную разность спектров в диапазоне 50–100 Гц и совпадение спектров на низких частотах (до 40Гц). На фрагменте рисунка 4.10.В 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.

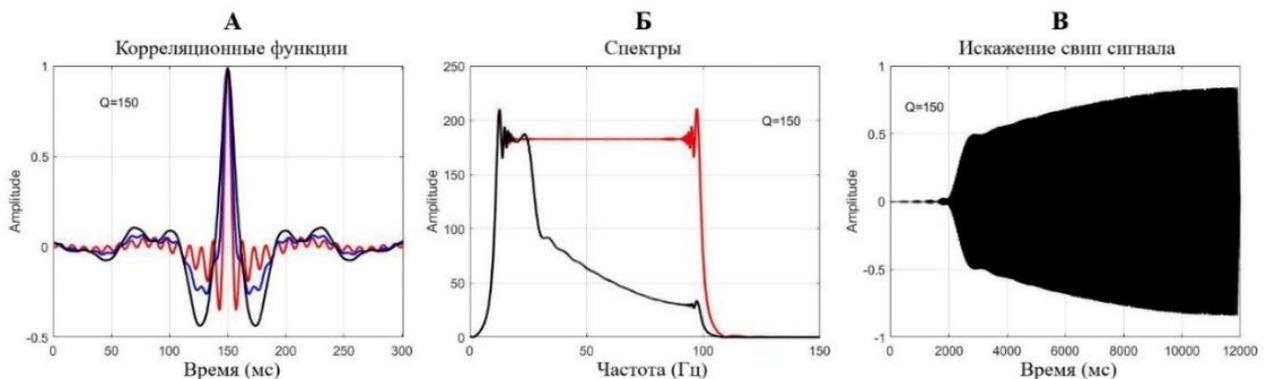


Рисунок 4.10. Корреляционные функции, спектры и разности опорного свипа и фильтрованного фильтром  $Q=150$ . Корреляционные функции (красная) – опорный свип; (черная) – фильтрованный свип; (голубая) – взаимная корреляция опорного и фильтрованного свипов.

#### 4.4. Коррекция данных с целью повышения разрешенности записей

Примеры параметрической коррекции и расширения спектров сейсмических данных приводятся на двух практических примерах. На фрагменте рисунка 4.11.А приведено волновое поле, зарегистрированное при вибросейсмическом возбуждении и корреляции с ЛЧМ свипом. На фрагменте рисунка 4.11.Б 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.

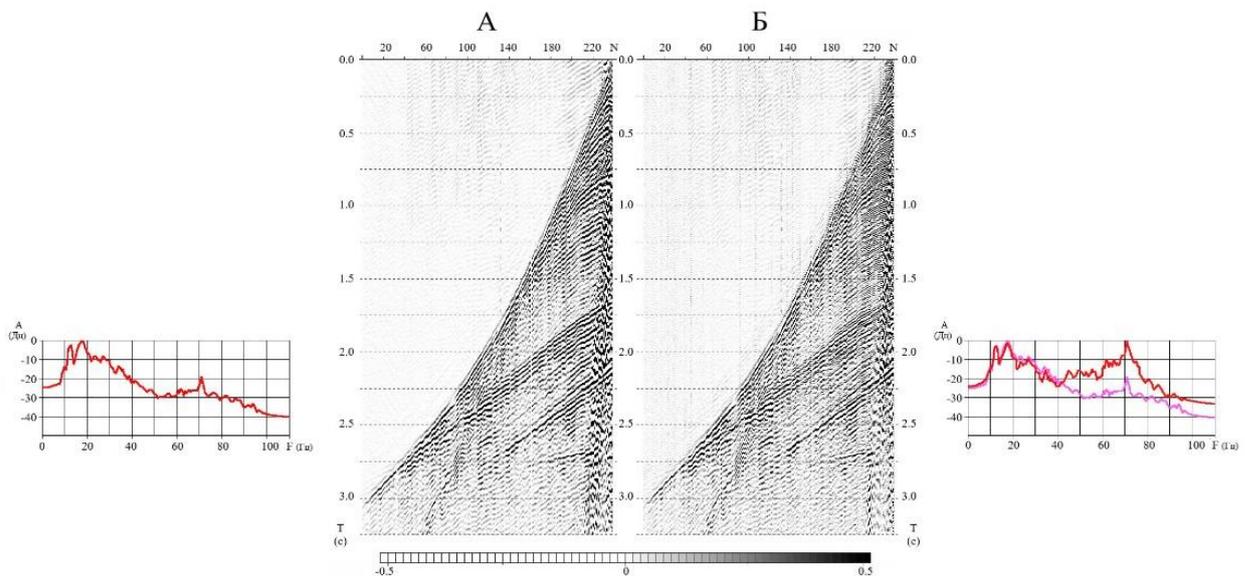


Рисунок 4.11. Сейсмограммы и амплитудные спектры. А – до коррекции; Б – после коррекции.

Пример применения корректирующей Q-фильтрации к временному разрезу представлен на рисунке 4.12. 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. Сравнивая волновые картины (фрагменты А и Б), можно видеть, что корректирующая фильтрация достаточно сильно повысила видимую частоту данных, сохранив при этом детали изображения, и не добавила дополнительных осей синфазности. Такое «мягкое» расширение спектра сейсмической записи на временном разрезе допустимо, так как не вносит дополнительных артефактов, повышая при этом разрешенность записи.

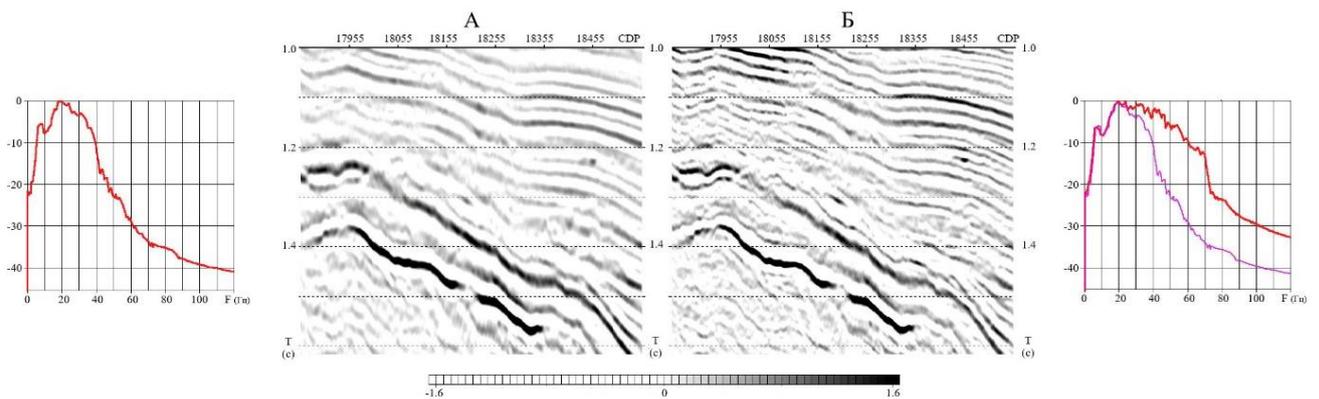


Рисунок 4.12. Временные разрезы и амплитудные спектры. А – до коррекции; Б – после коррекции Q-фильтрами.

#### 4.5. Корректирующая фильтрация данных ВСП

В современной вибросейсморазведке широко применяются методики, которые реализуют сложные свип сигналы или повторяющиеся вибрационные воздействия, имеющие цель расширить спектр сигнала на результирующих виброграммах (Жуков А.П. и др. 2011; Korotkov I., Zhukov A., 2020). Использование комбинированных свип сигналов и повышение доли высоких частот в свипе обусловлено тем, что при возбуждении высокочастотных компонент может происходить их поглощение в механической системе вибратор – грунт. Повышению

энергии высокой частоты в свипе позволяет генерировать в среде сейсмические сигналы с контролируемым частотным спектром. Объект исследования – волновые поля ВСП, полученные с использованием вибраторов, излучающих различные комбинированные свипы. Для сравнения и коррекции сигналов используется параметрический подход к определению амплитудных искажений в сейсмической записи.

Исходной информацией о возбуждаемом свип сигнале является функция автокорреляции. Для разных свипов автокорреляционные функции (АКФ) могут различаться длиной главного максимума, иметь различные по амплитуде побочные максимумы и длины «хвостов». Использование повторных наблюдений и комбинированных свип сигналов теоретически дает возможность сравнивать сейсмические волновые поля, и изучать вопросы изменения сигналов при возбуждении и прохождении в геологической среде (Адиев Т.Р., Коротков И.П. 2023). На рисунке 4.13. приведены волновые поля ВСП с выполненной компенсацией геометрического расхождения. На фрагменте А приведено поле ВСП, полученное с импульсным источником возбуждения и при небольшом отклонении пункта взрыва от положения вибраторов, используемых при вибрационном возбуждении сигнала. В качестве источника применялась небольшая 2-х литровая воздушная пушка. Это наблюдение не является эталоном, но может служить некоторой опорой для анализа изучаемой волновой картины ВСП. При вибрационных работах положение вибраторов было неизменным в течение всех проводимых работ. Последовательность наблюдений ВСП была такая, что при одном положении приборов в скважине выполнялась регистрация данных с использованием различных свипов. На трех фрагментах Б,В,Г рисунка 4.13. показаны разрезы ВСП, для которых в качестве источника сигнала использовалась группа из 2х вибраторов, генерирующая различные свип сигналы длиной 15 сек с изменением частоты от 3 до 120 Гц.

Волновые поля, показанные на рисунке 4.13., получены с различными свип сигналами. На фрагменте Б рисунка 4.13. поле ВСП получено при возбуждении линейного свип сигнала, в спектре которого генерировались минимально

возможные начальные частоты (в данной статье свип имеет индексацию LowF). На рисунке 4.14. показаны корреляционные функции трех тестируемых свипов, на рисунке 4.15. – их спектры. На фрагменте В рисунка 4.13. волновое поле ВСП получено при возбуждении сигнала, для которого амплитудная модуляция выполнялась по линейному закону в области логарифмического спектра. Величина  $Q$ , определяющая линейный наклон логарифмического спектра, равнялась 50. Индексация данного свипа на рисунках – Q50. На фрагменте Г рисунка 4.13. волновое поле ВСП получено с модуляцией свипа с существенным увеличением амплитуды высокочастотных гармоник. Индексация данного свипа на рисунках – IW1.

Форма падающей волны на полях ВСП при вибро-сейсморазведке определяется функцией автокорреляции используемых свипов (рисунок 4.14.). При визуализации полей на рисунке 4.13. представлена только часть волнового поля, на которой видна форма падающей прямой волны. Для того чтобы данные были сравнимы между собой и были видны первые вступления ко всем данным, применен мьютинг перед первыми вступлениями 75 мс. На волновых полях сложно оценить форму излучаемого сигнала, поэтому первоначально для различных свипов мы сравниваем теоретические формы автокорреляционных функций (рисунок 4.14.) и их спектры. Спектры (рисунок 4.15.) приведены в двух масштабах: линейном и логарифмическом. 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)

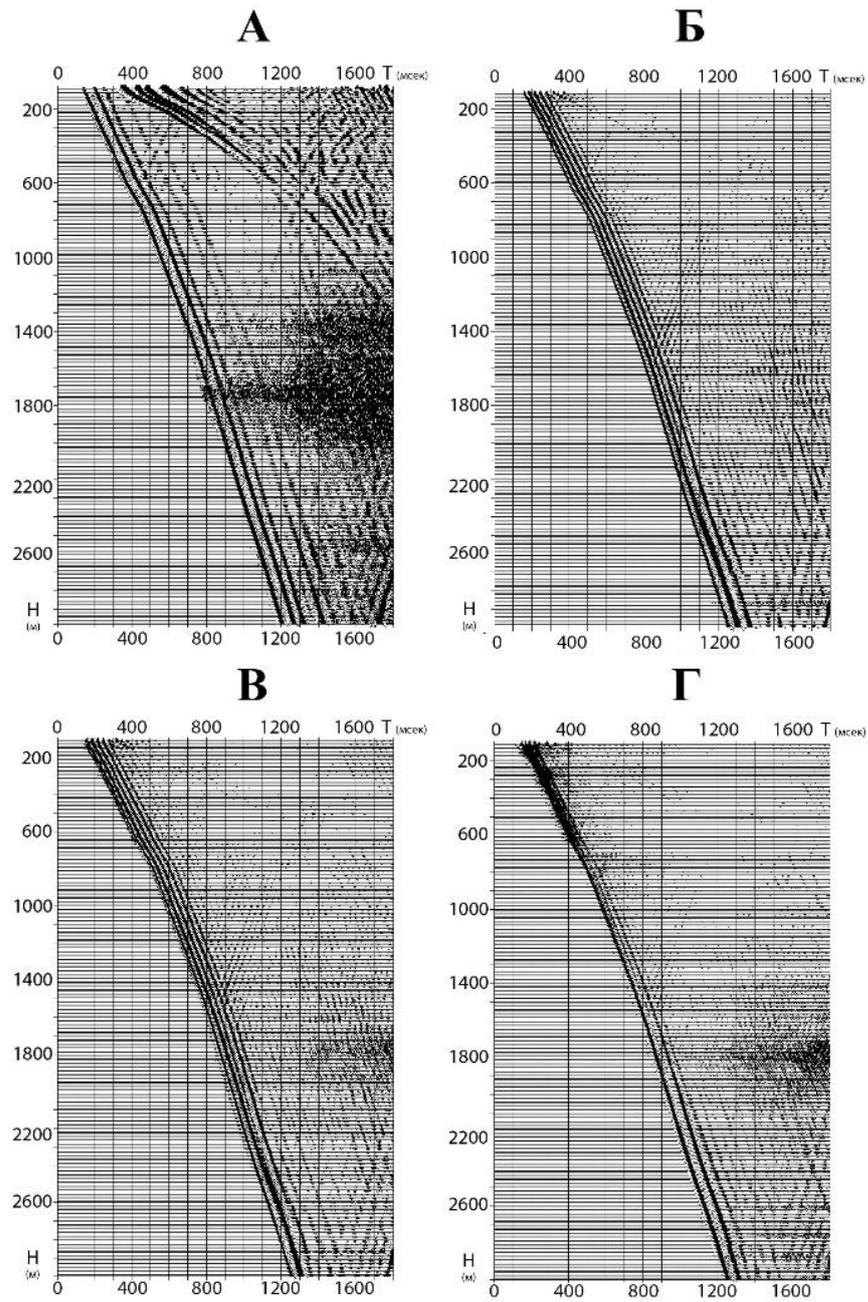


Рисунок 4.13. Наблюдаемые поля ВСП. А – импульсный источник; Б – ЛЧМ; В – Q50; В – IW1

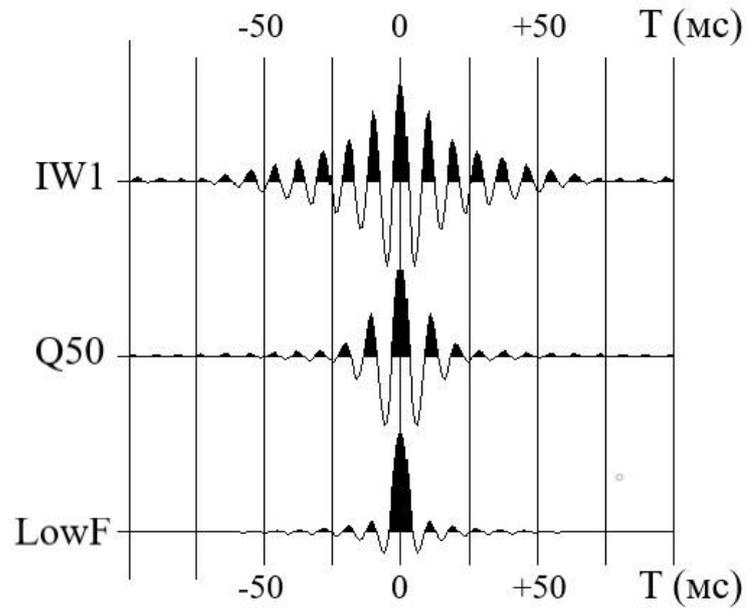


Рисунок 4.14. Корреляционные функции свип сигналов

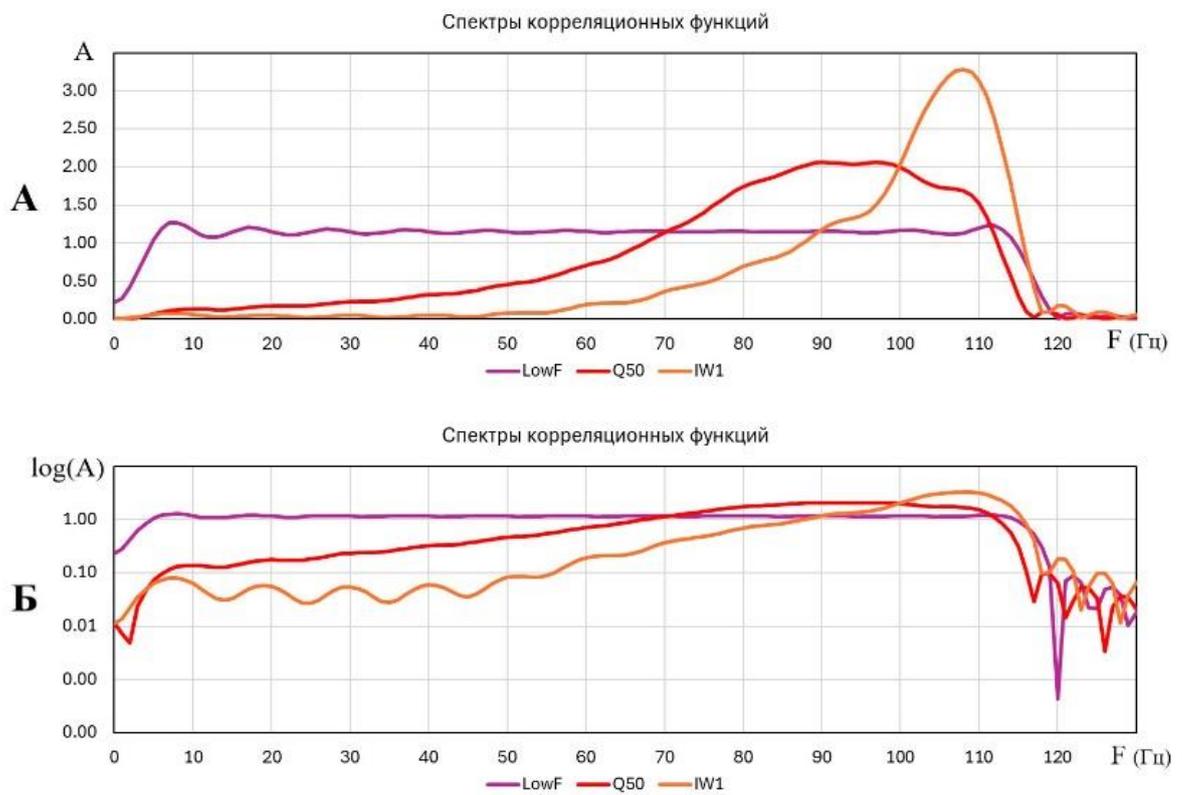


Рисунок 4.15. Спектры автокорреляционных функций различных свипов. В линейном (А) и логарифмическом масштабах (Б).

### Анализ спектров опорных свипов

При возбуждении, распространение и регистрации сигналов их форма и спектр изменяются. С точки зрения анализа условий возбуждения сигналов нам было бы интересно проанализировать подобие спектров АКФ свипов на различных частотах. На рисунке 4.16. приводятся отношения энергетических спектров. Спектры свипов IW1 и Q50 поделены на энергетический спектр широкополосного сигнала LowF. Для идеальных сигналов, то есть опорных свип сигналов, записанных на сейсмической станции, рассмотренные отношения спектров Q50 и IW1 к спектру LowF свипа повторяют исходные спектры АКФ, так как спектр LowF является константой в широком диапазоне частот.

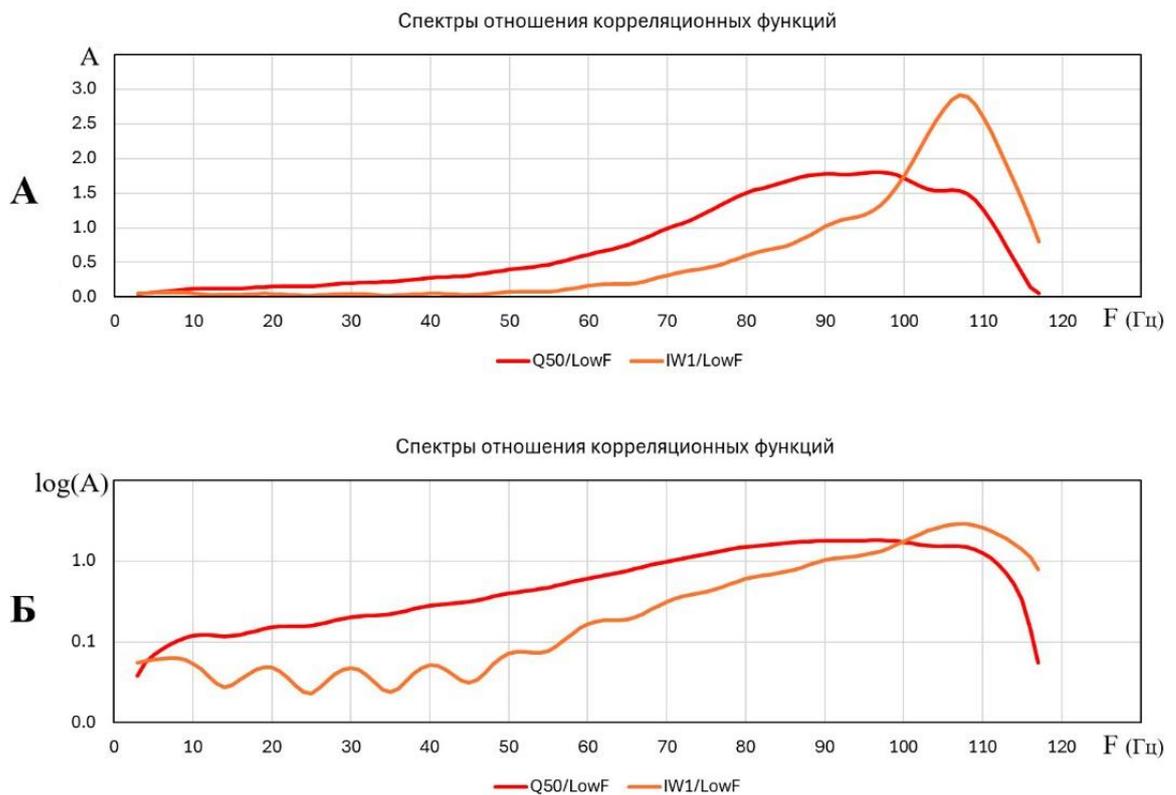


Рисунок 4.16. Спектры отношений энергетических спектров различных свипов. А – линейный масштаб; Б – Логарифмический масштаб.

При выполнении наблюдения ВСП с вибраторами в среде распространяются не опорные свипы, а искаженные при возбуждении и прохождении в геологической среде сигналы. Воспользуемся тем, что для фиксированного положения ПВ и ПП для сейсмической трассы с различными свипами импульсная характеристика среды одна и та же. Это дает право рассматривать отношения спектров АКФ трасс между собой и считать, что импульсная характеристика среды не вносит никакого вклада в вычисляемые отношения спектров. Так как для трасс условия регистрации и импульсная характеристика среды не изменяется, то отношения спектров будут показывать в основном различие в возбуждении сигналов.

На рисунке 4.17. приведены фрагменты разрезов ВСП, зарегистрированные на глубине 2000–2500 метров. На всех волновых картинах форма регистрируемого сигнала различна. Представленное на фрагменте А поле получено с импульсным источником и положение источника отличается от положения вибраторов на 50 метров. Импульсный источник располагался на глубине 1 м и поэтому, формирование спутников сигнала и кратных волн было такое же, как для вибрационного возбуждения. На поле импульсного источника в поле падающей волны можно видеть ряд частично – кратных волн, образованных в ВЧР и влияющих на форму сейсмического сигнала. Можно полагать, что подобные спутники должны быть зарегистрированы на виброграммах. Сравнивая между собой три поля на фрагментах Б, В, Г рисунка 4.17., можно видеть повторные максимумы, обусловленные спутниками. Но амплитуда максимумов в первых вступлениях в каждом волновом поле различна и определяется формой спектра свипа.

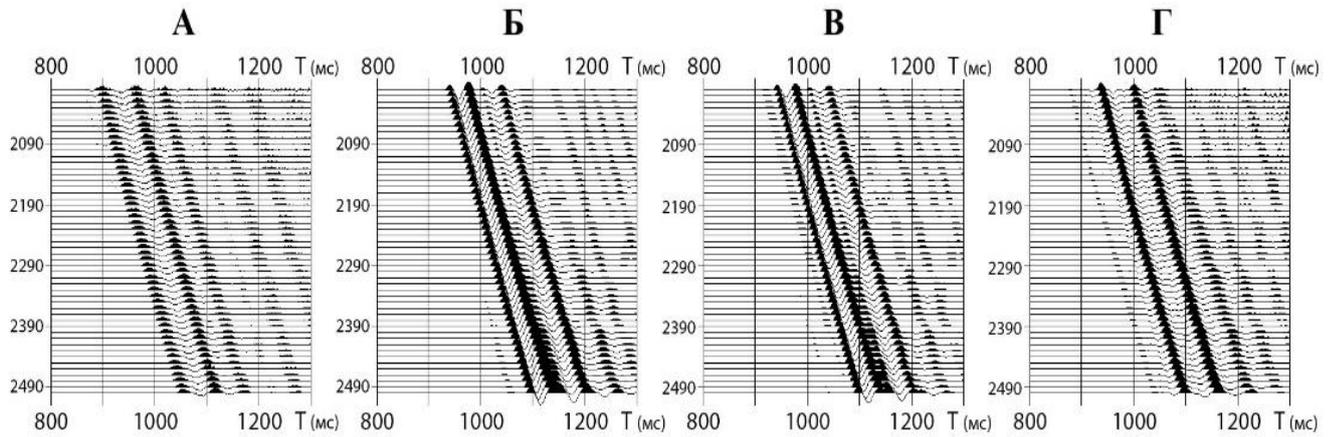


Рисунок 4.17. Наблюдаемые поля ВСП в области анализа. А – импульсный источник; Б – ЛЧМ; В – Q50; В – IW1

### Анализ спектров падающей волны на разрезе ВСП

На рисунке 4.18. представлены амплитудные 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. Для импульсного источника основной максимум спектра на частоте 18 Гц совпадает с максимумами спектров сигналов, полученных с вибрационным возбуждением. Для сигнала с импульсного источника спектр в области низких частот выше, а в области высоких частот ниже, чем для вибрационного возбуждения. На этом основании можно сказать, что вибрационное возбуждение по сравнению с импульсным источником имеет преимущество в том, что существует возможность с помощью вибраторов контролируемо изменять спектр возбуждаемого сигнала, преимущественно в области высоких частот.

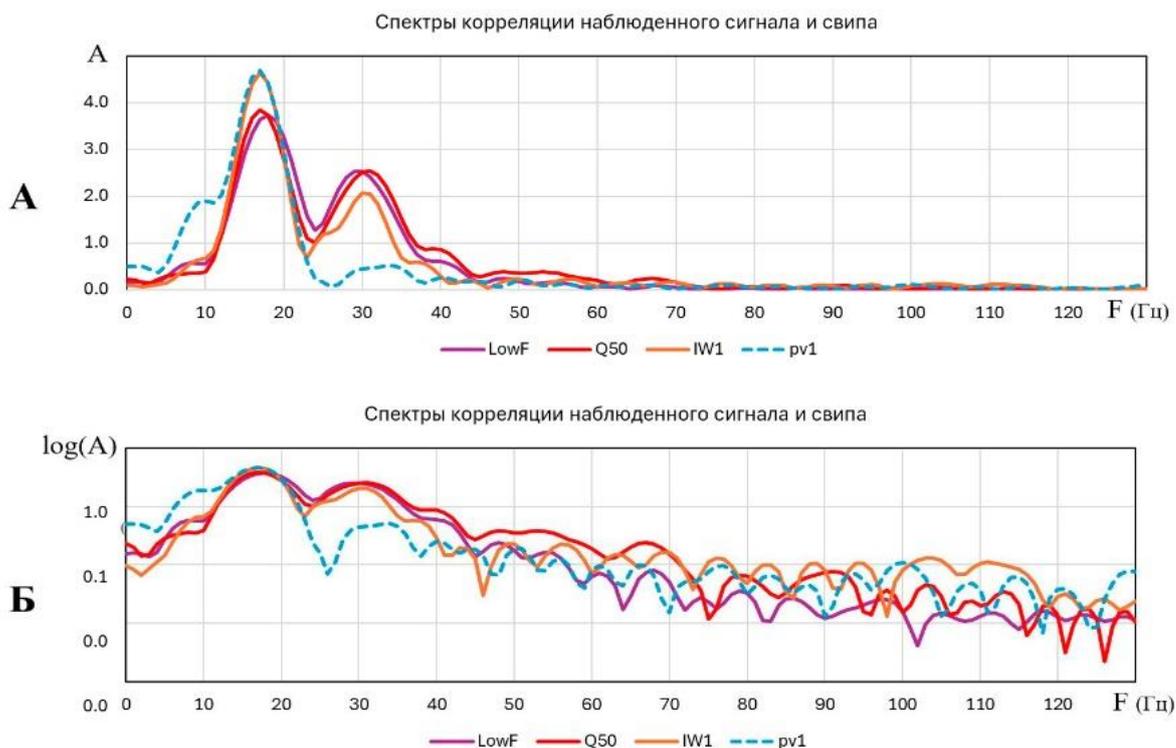


Рисунок 4.18. Спектры автокорреляционных функций одной сейсмической трассы ВСП для различных свипов. Окно анализа 500 мс. В линейном (А) и логарифмическом масштабах (Б).

При сравнении спектров сигналов на фрагментах Б, В, Г заметно, что спектры очень похожи между собой на частотах до 50 Гц. На спектрах вибро-сигналов четко прослеживается максимум на частоте 30 Гц, отсутствующий на спектре сигнала импульсного источника. Различия спектров LowF, Q50 и IW1 в области высоких частот проявляются при относительно небольших амплитудах, но хорошо заметны на графиках в логарифмическом масштабе. Рассмотрим относительное изменение спектров, повторив для наблюдаемых данных расчет, показанный на рисунке 4.17. Графики отношений  $Q50/lowF$  и  $IW1/lowF$  (рисунки 4.19А и 4.19Б соответственно) представлены линиями синего цвета. Графики отношений спектров Q50 и IW1 к спектру LowF дают информацию о различии спектров в области частот от 10 до 110 Гц. При этом в знаменателе отношения спектров стоит спектр LowF, который уже не является постоянной величиной, как для опорного свипа. На рисунке 4.18. можно видеть, что все спектры имеют два выраженных максимума на частотах 18 Гц и 30 Гц. Для сравнения на рисунке 4.19. представлены

отношения спектров, рассчитанные для опорных сигналов ( $C_{Q50/lowF}$  и  $C_{IW1/lowF}$ ). Так как абсолютные значения наблюдаемых сигналов изменились, то для каждого спектра в диапазоне 10–60 Гц была выполнена нормировка кривых, уравнивающая амплитуду опорного отношения ( $C_{Q50/lowF}$  и  $C_{IW1/lowF}$ ) с графиком отношений наблюдаемых спектров ( $Q50/lowF$  и  $IW1/lowF$ ). Графики нормированных опорных отношений ( $N_{Q50/lowF}$  и  $N_{IW1/lowF}$ ) представлены на рисунке 4.19. пунктирной линией.

Анализируя изменения спектральных отношений, можно видеть, что отношение спектров в диапазоне частот 15–60 Гц не изменились. Для диапазона частот выше 60 Гц видно, что амплитуды гармоник для свипов Q50 и IW1 стали меньше относительно спектра LowF. Причину относительно большего затухания амплитуд по данному эксперименту выяснить сложно. Можно только отметить факт, что для свипов с увеличением амплитуды высокочастотных гармоник происходит различное (в зависимости от амплитуды) поглощение в диапазоне частот выше 60 Гц в данном полевом эксперименте.

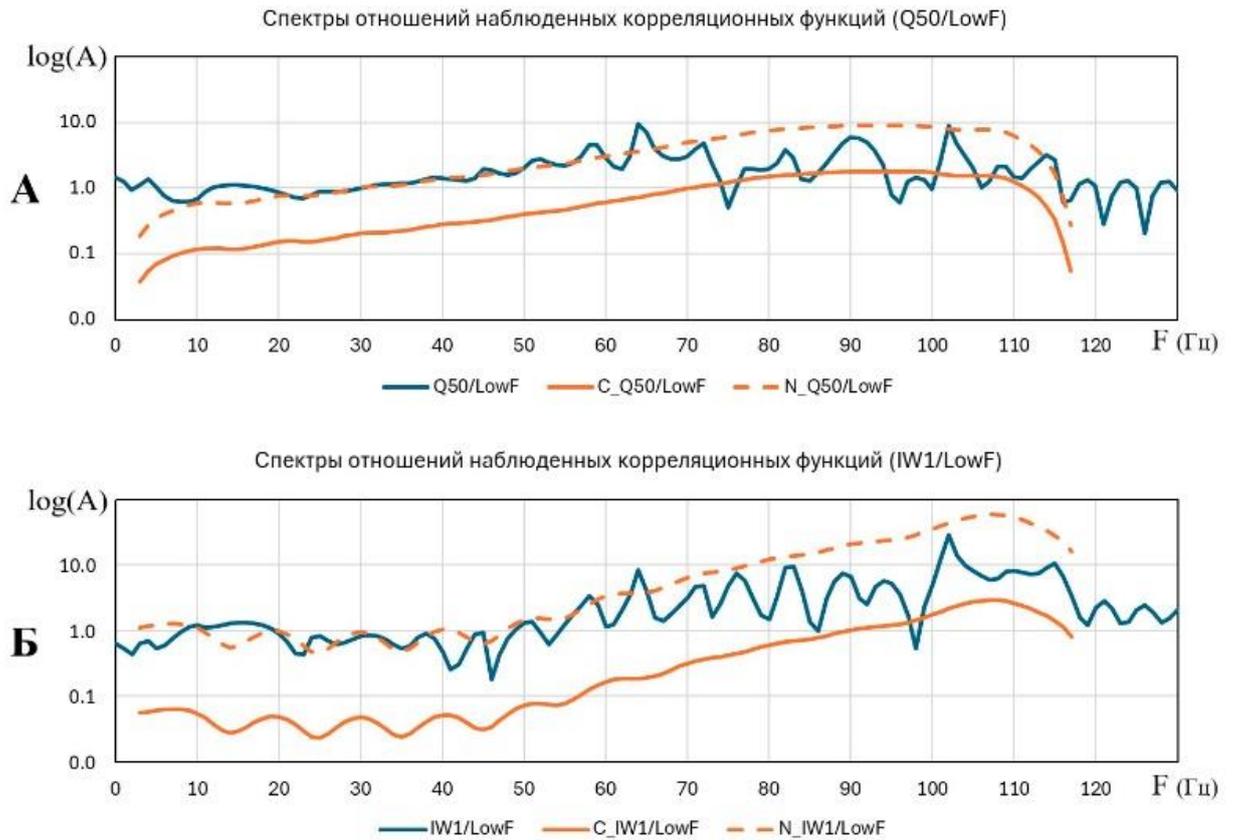


Рисунок 4.19. Спектры отношений автокорреляционных функций одной сейсмической трассы ВСП для различных свипов. Окно анализа 500 мс. В логарифмическом масштабе.

### Корректирующая фильтрация данных ВСП

Для того чтобы определить эффективность различных методов возбуждения сигнала для проведения работ ВСП, выполним корректирующую амплитудную фильтрацию волновых полей. Используем для компенсации высокочастотных компонент полосовые фильтры, построенные по принципу компенсации поглощения. Для этого используются фильтры, зависящие только от одного параметра  $Q$ , где  $Q$  коэффициент линейного искажения логарифмического спектра фильтра (Королев Д.А. и др. 2022). На рисунке. 4.18. были приведены спектры трех различных трасс и обсуждались особенности изменения частотного состава спектров в области высоких частот. Для компенсации искажений в области

высоких частот используем Q фильтры в диапазоне 40–90 Гц. На рисунке 4.20. 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 Q50 (рисунок 4.17.В) и IW1 (рисунок 4.17.Г) применены фильтры, построенные в том же диапазоне частот, с параметрами  $Q=90$  и  $Q=100$  (для фильтров Q50 IW1 соответственно).

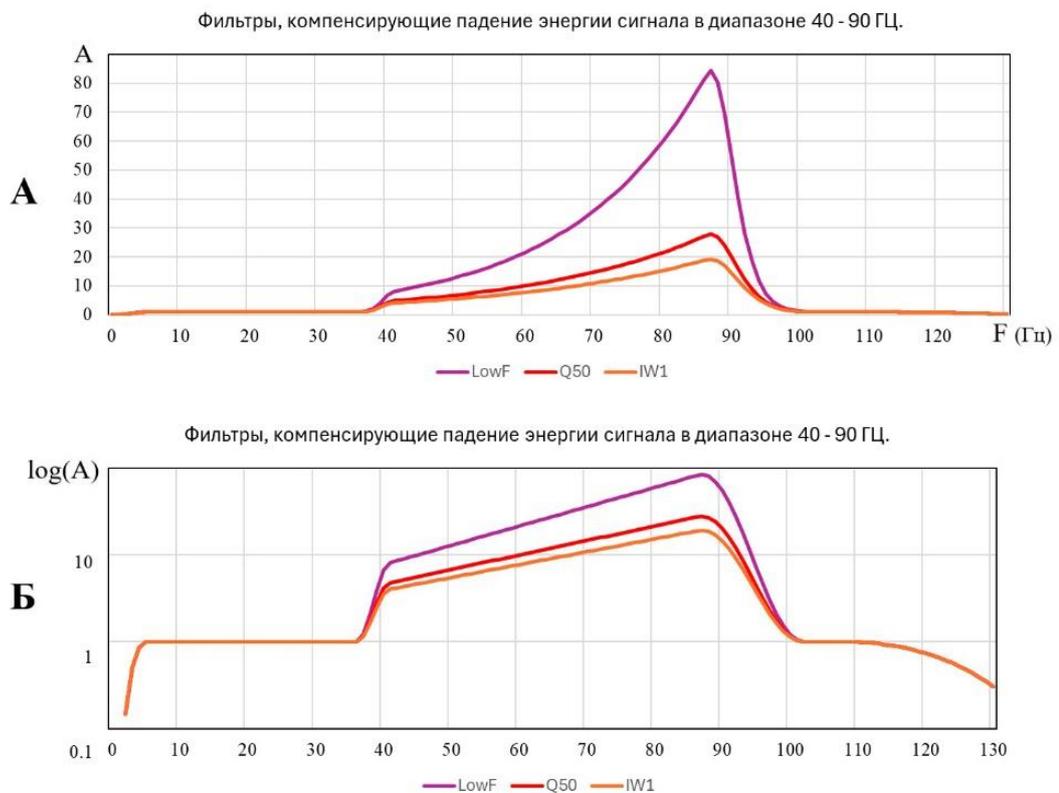


Рисунок 4.20. Спектры корректирующих Q-фильтров, используемых для коррекции вибросейсмических записей. А – линейный масштаб; Б – логарифмический масштаб.

По спектрам трасс после применения коррекции можно видеть, что восстановление высокочастотных составляющих спектров сигнала с помощью полосовых Q фильтров выполнено достаточно хорошо. На спектрах с линейным масштабом (рисунок 4.21.А) можно видеть, что спектры всех вибросигналов имеют похожую структуру, совпадающие по положению локальные максимумы и

минимумы. Это означает, что импульсная характеристика среды на данной трассе ВСП сохраняется при выполнении коррекции. На спектрах в логарифмическом масштабе (рисунок 4.21.Б) 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.

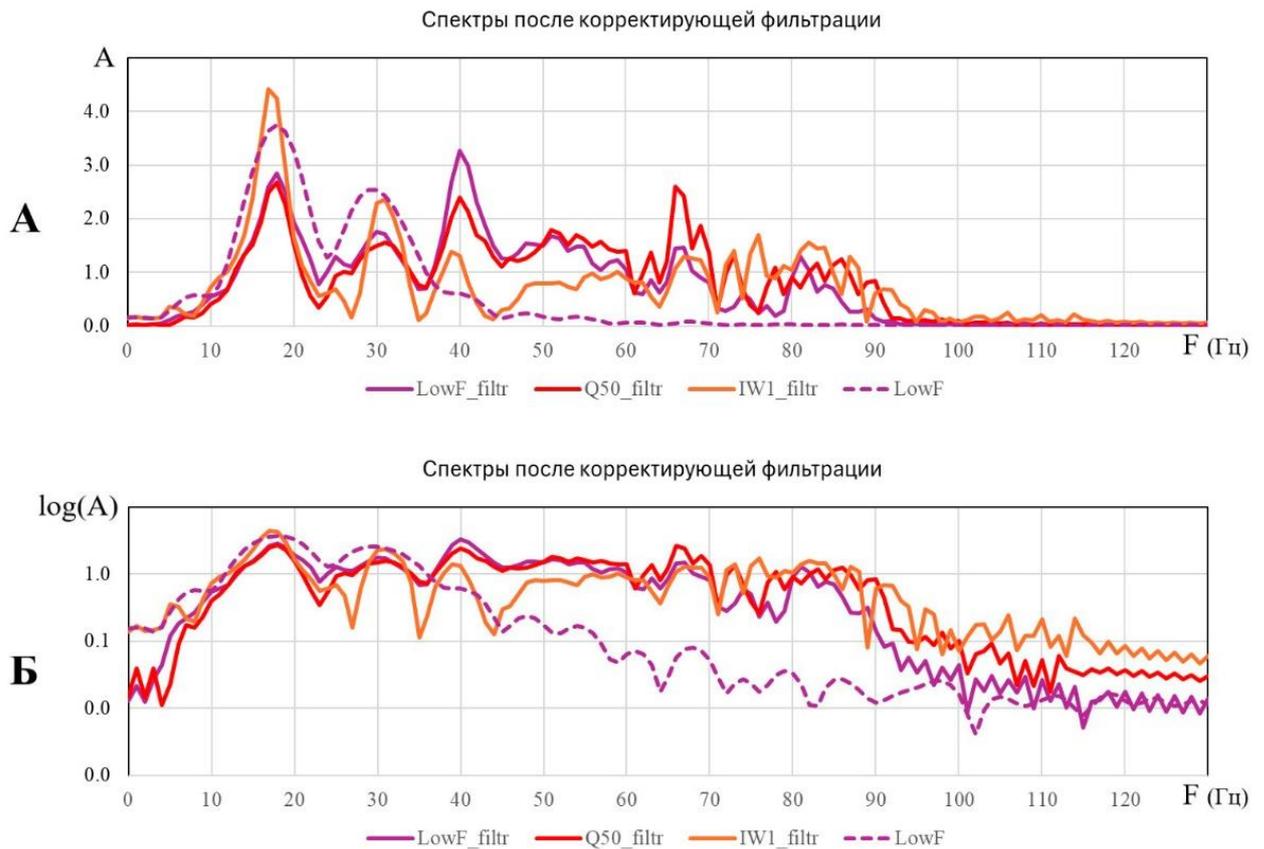


Рисунок 4.21. Спектры трассы ВСП (N=2290м) после применения корректирующих фильтров. А – линейный масштаб; Б – Логарифмический масштаб. Сиреневый график пунктирная линия – Спектр LowF свипа до применения корректирующего фильтра.

Результаты сравнения волновых полей (рисунок 4.22.) 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. По-видимому, низкочастотная область спектра для двух волновых полей была похожей, что позволило получить близкие результаты коррекции. Волновое поле, зарегистрированное с высокочастотным сигналом IW1 после коррекции, восстановилось не так хорошо. На фрагменте рисунка 4.22.В после коррекции наблюдается высокий уровень высокочастотных шумов. При анализе по спектрам высокочастотная часть спектра сигнала IW1 восстановлена хорошо. Но различие с данными LowF и Q50 на низких частотах большая. Это привело к тому, что форма волнового поля сильно отличается и на результатах наблюдается большой уровень помех. Сравнение данных говорит о том, что использование свипов с большим градиентом амплитуд между низкими и высокими частотами может потребовать более существенной обработки, чтобы быть сравнимым с результатами наблюдений с обычными ЛЧМ свипами. Для обработки наблюдаемых (IW1 – свип) данных требуется дополнительное восстановление волнового поля на низких частотах и, возможно, фазовая коррекция наблюдаемых данных.

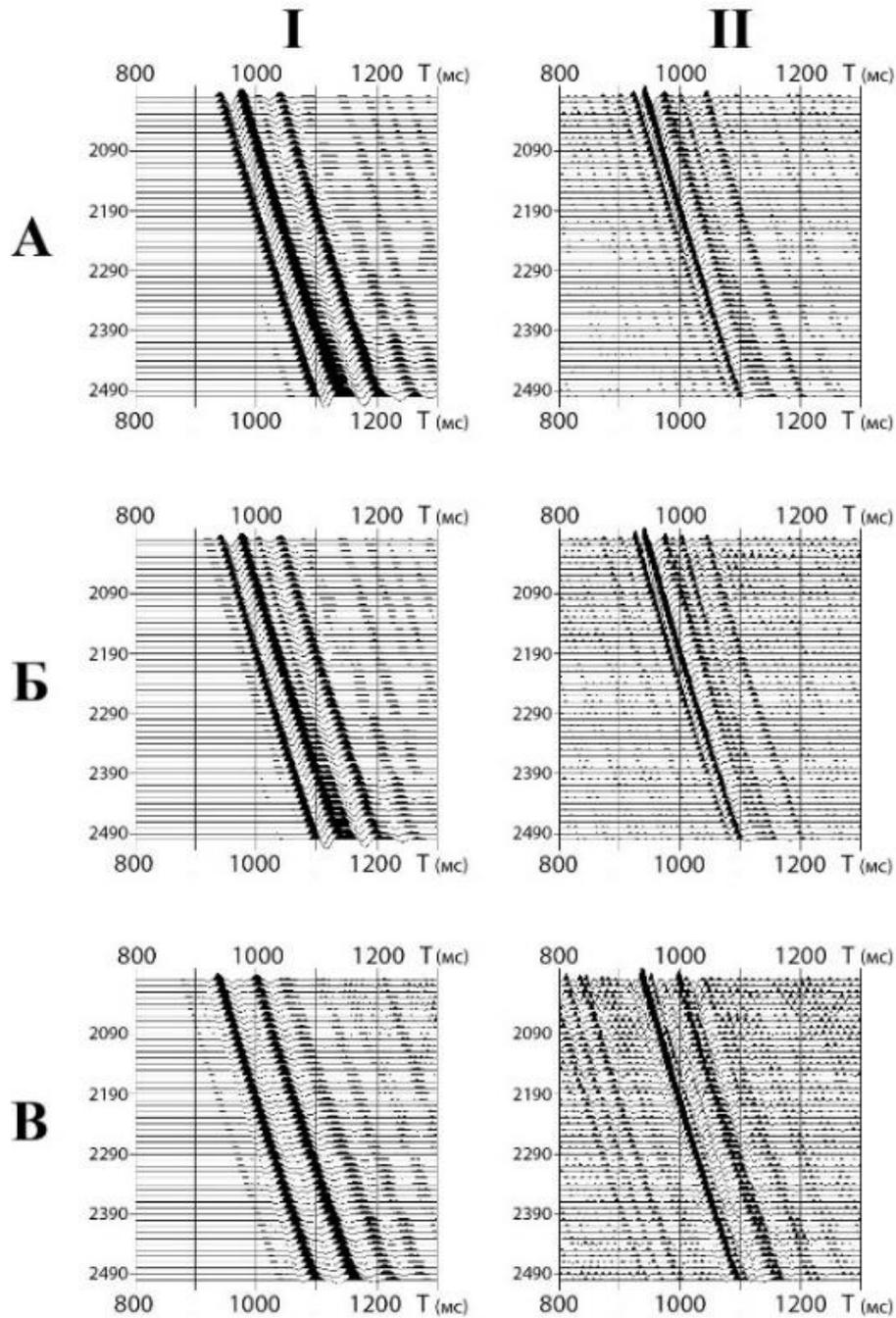


Рисунок 4.22. Поля ВСП до (столбец – I) и после применения корректирующей фильтрации Q-фильтрами в диапазоне 40–90Гц (столбец – II). А – ЛЧМ сигнал LowF; Б – сигнал с линейным возрастанием амплитуды в логарифмическом спектре – Q50; В – сигнал с повышенными амплитудами в области высоких частот – IW1

В представленном примере выполнен анализ и коррекция формы, падающей волны на данных ВСП с помощью параметрической полосовой Q фильтрации. При

визуальном анализе и на амплитудных спектрах хорошо видно повышение частотного состава волнового поля при применении свипов с увеличенным уровнем амплитуд на высоких частотах. На низких и средних частотах от 10 до 50 Гц поглощение пропорционально энергии сейсмического сигнала, возбуждаемого вибратором. Для высокочастотных свипов, по сравнению со стандартным линейным свипом, на частотах выше 50 Гц наблюдается дополнительное уменьшение энергии наблюдаемого сейсмического сигнала. На полевых данных ВСП показано, что компенсация потери энергии на высоких частотах может быть выполнена с помощью специальных параметрических корректирующих Q фильтров. Так как используемые фильтры могут вносить только линейные (в логарифмической области) изменения спектра, то их использование предполагает сохранение без искажения частотной характеристики среды.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы и результаты работы сводятся к следующему:

1. Предложен метод определения искажений сейсмических сигналов на основе применения полосовых параметрических фильтров с одним неизвестным параметром  $Q$ , характеризующим наклон логарифмического спектра. Изложенное в главе 2 тестирование подтверждает **защищаемое положение №1**.

2. Предложен метод трехпараметрической коррекции фазового спектра сейсмического сигнала, основанный на использовании трёх коэффициентов разложения фазового спектра в ряд. Метод изложен в главе 2, обосновывает **защищаемое положение №2**.

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

4. Предложенные методы и методика исследованы на синтетических моделях и реальных сейсмических данных.

5. Исходя из опыта применения методики коррекции искажений сейсмических сигналов, рекомендуется для каждой наземной сейсмической съемки 3D выполнять полевые работы ВСП, контролирующие условия возбуждения сейсмических сигналов.

6. Практическая значимость работы подтверждена применением разработанных методов анализа и восстановления сигналов в практических производственных проектах компании ООО «ПетроТрейс»

**(Выводы 4, 5 и 6 подтверждают 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.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- 1 Авербух А.Г. Изучение состава и свойств горных пород при сейсморазведке. Москва – Недра – 1982
- 2 Авербух А.Г., Лаврик А.С., Шушакова Н.С. Изучение поглощения продольных волн по данным ВСП и наземных наблюдений. // В сб.: Современное состояние и перспективы развития математического обеспечения обработки и интерпретации сейсмической информации. М., ВНИИОЭНГ – 1987 – С.92 – 100.
- 3 Авербух А.Г., Шушакова Н.С. Изучение поглощающих свойств пород по данным отраженных волн. // РНТС Нефтегазовая геология и геофизика. – М.: ВНИИОЭНГ. – 1981 – №9.
- 4 Авербух А.Г. Определение дисперсии скоростей упругих волн по амплитудной характеристике среды // Прикладная геофизика. – 1969. – № 57. – С. 50–60.
- 5 Авербух А.Г. Распространение сейсмического импульса в среде с линейной зависимостью коэффициента поглощения от частоты // Прикладная геофизика. – Москва – Недра – 1970. – Т. 61.
- 6 Адиев Т.Р., Коротков И.П., Вибросейсмическая полевая методика независимого одновременного возбуждения нескольких управляемых Q – свипов для совместного увеличения производительности работ и улучшения качества данных. // Геофизика – 2023. – № 6. – С.16–21.
- 7 Альтшулер С.В., Фиников Д.Б., Лангман А.Б. Параметрические методы спектрального анализа в сейсморазведке. М. – Разведочная геофизика. – Обзор ВИЭМС – 1986
- 8 Бриллинджер Д. Временные ряды. Обработка данных и теория. – Москва - Мир – 1980.
- 9 Бутырский Е.Ю. Преобразование Гильберта и его обобщение. // Научное приборостроение – 2014 – том 24 – № 4 – С. 30–37

- 10 Гогоненков Г.Н. Изучение детального строения осадочных толщ сейсморазведкой. – Москва – Недра – 1987.
- 11 Гонсалес Р., Вудс., Цифровая обработка изображений. – Москва – 2019
- 12 Гудмен Дж. Введение в Фурье – оптику. – Мир. – 1970.
- 13 Денисов М.С., Фиников Д.Б. Оценка относительного декремента поглощения сейсмических волн по критерию минимума дисперсии ошибки предсказания // Геология и геофизика. – 1999. – № 40. – С. 264–269.
- 14 Денисов М.С., Фиников Д.Б. Способ оценивания амплитудного спектра сейсмического импульса и алгоритм “амплитудной деконволюции” // Геофизика. – 1997. – № 2. – С. 17–23.
- 15 Денисов М.С., Оберемченко Д.М., Фиников Д.Б. Амплитудная деконволюция сейсмических записей с учетом частотно зависимого поглощения //Геофизика. – 1999 – №. 4 – С. 25–29.
- 16 Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика» – 2001.
- 17 Дьяконов В.П. Вейвлеты. От теории к практике. – М.: СОЛОН-Р – 2002.
- 18 Жмудь В.А., Димитров Л.В. Повышение точности и надежности измерения разности фаз//Автоматика и программная инженерия. – 2017 – №1(19)
- 19 Жмудь В.А. Ляпидевский А.В., Димитров Л.В. Дополнительное повышение точности измерения разности фаз путем вторичной синхронизации отсчетов разностной частоты.//Автоматика и программная инженерия. – 2017 – №1(19)
- 20 Жуков А.П., Колесов С.В., Шехтман Г.А., Шнеерсон М.Б. Сейсморазведка с вибрационными источниками. – Тверь – 2011.
- 21 Жуков А.М. Исследование способов измерения поглощения упругих волн по данным сейсморазведки МОВ при прямых поисках нефти и газа. – Москва: МИНХиГП – 1981.

- 22 Калинин А.В., Калинин В.В., Владов М.Л., Кульницкий Л.М. Метод расчета синтетических сейсмограмм для случая нормального падения сферической волны на систему плоско – параллельных поглощающих слоев // Прикладная геофизика. – 1977. – № 85.
- 23 Канасевич Э.Р. Анализ временных последовательностей в геофизике. – Москва – Недрa – 1985.
- 24 Клаербоут Дж.Ф. Теоретические основы обработки геофизической информации с приложением к разведке нефти. Пер. с англ. – Москва. – Недрa – 1981.
- 25 Клаербоут Дж.Ф. Сейсмическое изображение земных недр. Пер. с англ. – Москва – Недрa – 1989.
- 26 Козлов Е.А., Гогоненков Г.Н. и др. Цифровая обработка сейсмических данных. Москва – Недрa – 1973.
- 27 Кондратьев О.К. Сейсмические волны в поглощающих средах. – Недрa – 1986.
- 28 **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).
- 29 **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).
- 30 **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).

- 31 **Королев Д.А.**, Шевченко А.А. Сравнение волновых полей ВСП, полученных с использованием различных свип сигналов // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2024. – № 3. – С. 37–45. (1,21 п.л, вклад автора 60%, ИФ РИНЦ – 0,044).
- 32 **Королев Д.А.**, Королев А.Е., Шевченко А.А. Параметрические методы коррекции сигналов в виброразведке // Труды V Международной геолого-геофизической конференции «ГеоЕвразия-2022. Геологоразведочные технологии: наука и бизнес» – 2022 – Том III –С.57–60
- 33 Кунченко Д. С., Родин И.В., Фиников Д.Б. Оценивание параметров поглощения и Q-деконволюция в пластовой модели среды в обобщённой статистической модели сейсмической трассы // Сборник тезисов Международной геолога – геофизической конференции и выставки «ГеоЕвразия 2019. Современные технологии изучения и освоения недр Евразии» [сборник]. – Тверь – ООО «ПолиПРЕСС». – 2019. – С. 475–479.
- 34 Кунченко Д.С., Фиников Д.Б. О задачах деконволюции сейсмических записей и возможностях контроля формы сигнала // ГеоЕвразия 2018. Современные методы изучения и освоения недр Евразии. – 2018. – С. 579 – 582.
- 35 Кунченко Д.С., Овчинников К.Р., Фиников Д.Б. О задачах деконволюции сейсмических записей и возможностях контроля искажений формы сигнала. Москва//Приборы и системы разведочной геофизики – 2022 – 3(74)
- 36 Кунченко Д.С., Фиников Д.Б., Шалашников А.В. Влияние фазового спектра сигнала на результаты робастной деконволюции // ГеоЕвразия 2020. Современные методы изучения и освоения недр Евразии. – 2018. – С. 45–48.
- 37 Малкин А.Л. Негауссовская статистическая модель сейсмической записи // Геология и геофизика. – 1989 – №. 1 – С. 106–115.
- 38 Малкин А.Л. Сорин А.Я., Фиников Д.Б. Применение кумулянтного анализа в статистической обработке сейсмической записи // Геология и геофизика. СО АН СССР – 1986. – №5 – С. 356–360

- 39 Малкин А.Л., Фиников Д.Б. Интегральные оценки параметров сейсмических сигналов // Геология и геофизика. – 1984 – №10
- 40 Малкин А.Л., Фиников Д.Б. Параметризация фазового спектра сейсмического сигнала // Геофизический журнал АН Украинской ССР 1989 – Том 11 – №4 – С.79–84.
- 41 Малкин А.Л., Фиников Д.Б. Способы оценивания временной разрешенности сейсмической записи. // Геология и геофизика – 1986 – №12 – С.90–101
- 42 Малкин А.Л., Фиников Д.Б. Фазовая деконволюция. Теоретический аспект. //Геология и геофизика – 1988 – № 3. С.86–93
- 43 Малкин А.Л., Фиников Д.Б. Фазовая деконволюция. Вопросы реализации // Геология и геофизика – 1988 – № 4 – С.119–125
- 44 Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения: Пер. с англ. – М.:Мир – 1990.
- 45 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).
- 46 Мацуока Т., Ульрих Т.Дж. Оценивание фазового спектра сигнала по биспектру сейсмической записи. ТИИЭР: Пер. с англ., 1984 – Том 72 – №10 – С.200–209.
- 47 Мушин И. А., Бродов Л. Ю., Козлов Е. А. Методики спектрально – временного анализа – Москва – 1990
- 48 Напалков Ю.В. Спектральные представления в сейсморазведке. Часть I. Основы теории спектров. М. – 1974.
- 49 Напалков Ю.В. Спектральные представления в сейсморазведке. Часть II. Преобразования типа Фурье. М. – 1977.
- 50 Напалков Ю.В. Спектральные представления в сейсморазведке. Часть III. Сингулярные сигналы и спектры. М. – 1977.

- 51 Напалков Ю.В. Сердобольский Л.А., Основы теории интерференционных систем в сейсморазведке. Теория волновой фильтрации. М. – 1981.
- 52 Нахамкин С.А. Интерференционные преобразования сейсмических полей. В кн: Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн. Вып. XVII. Л., Наука – 1977 – С 5–134.
- 53 Овчинников К.Р., Рябинский М.А., Фиников Д.Б. Фазовая деконволюция 3D – данных сейсморазведки. Технологические и методические аспекты применения статистического алгоритма коррекции фазового спектра // Геофизика – 2022 – №3 – С. 16–22
- 54 Оппенгейм Э. Применение цифровой обработки сигналов. М. «Мир» – 1980
- 55 Папулис А. Теория систем и преобразований в оптике. М.:Мир – 1982.
- 56 Полубояринов М.А., Фиников Д.Б. Предсказывающая деконволюция в задаче коррекции нестационарных сейсмических записей // Технологии сейсморазведки. – 2006 – №. 1 – С. 24–32.
- 57 Пирогова А.С. Оценка частотно – зависимого затухания сейсмических волн посредством полноволновой инверсии данных вертикального сейсмического профилирования // Автореферат на соискание уч. ст. к.т.н. – 2019.
- 58 Прэтт У. Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. – Москва – Мир – 1982. – Кн.1.
- 59 Рапопорт М.Б. 1993, Вычислительная техника в полевой геофизике. 2-ое издание переработанное и дополненное. – Москва. – Недра.
- 60 Рапопорт М.Б., Рыжков В.И. Технология сейсморазведки, основанная на эффекте сейсмической неупругости. Международная геофизическая конференция. Тезисы докладов. – Москва – 2003
- 61 Рапопорт М.Б., Рапопорт Л.И., Рыжков В.И. Эффект сейсмической неупругости залежей углеводородов и его использование при поисках, разведке и эксплуатации нефтегазовых месторождений, «Геология, геофизика и разработка нефтяных месторождений» – 1997 – № 8

- 62 Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику, Ч. 1, Случайные процессы – Москва – 1976.
- 63 Силвия М.Т., Робинсон Э.А. Обратная фильтрация геофизических временных рядов при разведке на нефть и газ. – М.:Недра – 1983.
- 64 Терешкин Д.О., Семибаламут В.М. Современные методы измерения частоты и фазы в реальном времени. Автоматика и программная инженерия – 2018 – №2(24)
- 65 Троян В.Н. Статистические методы обработки сейсмической информации при исследовании сложных сред. Москва – Недра – 1982.
- 66 Тэтэм Р.Х. Многомерная фильтрация сейсмических данных. ТИИЭР: Пер. с англ. – 1984 – Т.72 – №10 – С.147–160.
- 67 Фиников Д.Б. Симметрирующие фильтры // Технологии сейсморазведки. 2007 – № 1 – С. 26–36.
- 68 Фиников Д.Б., Сорин А.Я. Возможности определения формы сигнала в рамках традиционной модели сейсмической трассы. // Деп. ВИНТИ. № 3625 – 84 деп.
- 69 Харкевич А.А. Спектры и анализ. Избранные труды. – М.Наука – 1973 – Т.2
- 70 Харкевич А.А. Теория электроакустических преобразователей. Волновые процессы. Избранные труды. – М., Наука, – 1973 – Т.1
- 71 Шевченко А.А., Черкашнев С.А. Особенности оценки фазового спектра сейсмической записи при сопоставлении данных ВСП и ОГТ. Международная геолого-геофизическая конференция «ГеоЕвразия–2018. Современные технологии изучения и освоения недр Евразии». – Москва – 2018
- 72 Шевченко А.А., Селезнев И.А., Касимов А.Н. Оценка поглощения энергии сейсмической записи по данным ВСП. Технологии сейсморазведки – 2007 – №4 – С.10–15
- 73 Шерифф Р., Гелдарт Л., Сейсморазведка – М.: Мир – 1987 – Т.1,2

- 74 Cantillo J, Throwing a new light on time – lapse technology, metrics and 4D repeatability with SDR//The Leading Edge – 2012 – April – P.405–413
- 75 Dasgupta,R., and R.Clark, 1988, Estimation of Q from surface seismic reflection data//Geophysics – 63 – P. 2120–2128.
- 76 Gibson, B., Lerner, K. (1984). Predictive deconvolution and the zero-phase source. //Geophysics – 49(4) – P.379–397
- 77 Guerra R., Leaney S.. Q(z) model building using walkaway VSP data. //Geophysics – vol.71 – №.5 – 2006 – P.v127–v132.
- 78 Kragh, E., and P. Christie Seismic repeatability, normalized RMS, and predictability//The Leading Edge – 2002 – 21 – №.7 – P. 640–647,
- 79 Korotkov Ilya, Zhukov Aleksander. Invers Q sweep Signal for Broadband Vibroseis Acquisition// In SEG Technical Program Expanded Abstracts – 2020. – P.116–120
- 80 Leaney,S., 1999 Walkaway Q inversion: 69<sup>th</sup> Annual International Meeting,//SEG, Expanded Abstracts – P.1311–1314.
- 81 Margrave, G. F., Lamoureux, M. P., & Henley, D. C. Gabor deconvolution: Estimating reflectivity by nonstationary deconvolution of seismic data.// Geophysics – 2011– 76(3) – W15–W30
- 82 Mitra S., Sacchi M.D. Non – minimum phase wavelet estimation by non – linear optimization of all – pass operators.//Geophysical Prospecting – 2007 – 55 – P.223–234
- 83 Rosa, A. L. R., Ulrych, T. J. Processing via spectral modeling.//Geophysics – 1991 – 56(8) – P.1244–1251
- 84 Robinson, E. A., Treitel, S.. Principles of digital wiener filtering.//Geophysical Prospecting – 1967 – 15(3) – P.311–332.
- 85 Robinson E.A. Predictive decomposition of time series with application to seismic exploration//Geophysics – 1967 – No. 3 – P.418–484
- 86 Robinson E.A. Statistical Pulse Compression.//Proceedings of the IEEE – 1984 – Vol. 72 – № 10 – P. 1276–1289

- 87 Taner, M. T., Koehler, F. Surface consistent corrections.//Geophysics – 1981 – 46(1) – P.17–22
- 88 Wang,Y., A stable and efficient approach to inverse Q-filtering//Geophysics – 2002– 67 – P. 657–663.
- 89 Wang,Y. Quantifying the effectiveness of stabilized inverse Q-filtering// Geophysics – 2003– 68 – P. 337–345.
- 90 White, R.E., The accuracy estimation Q from seismic data//Geophysics – 1992 – 57 – P.1508 –1511.
- 91 White R., Simm R., Tutorial: Good practice in well ties.//First Break – 2003 – 21 – P. 75–83
- 92 Zang,C., and T.Ulrych, Estimation of quality factor from CMP records// Geophysics – 2002 – 67 – P. 1542–1547.
- 93 Ziolkowski, A. Why don't we measure seismic signatures? // Geophysics – 1991 56(2) – P. 190–201
- 94 Partyka, G. A., J. A. Gridley, and J. A. Lopez, Interpretational aspects of spectral decomposition in reservoir characterization//The Leading Edge – 1999 – 18 – P. 353–360.
- 95 O.Portniaguine, J.P.Castagna, Inverse spectral decomposition//SEG – 2004 – Expanded Abstracts
- 96 D.Locci – Lopez, R.Zhang, A.Oyem, J.P.Castagna,The Multi – Scale Fourier Transform.//SEG 2018 Annual Meeting Expanded Abstracts
- 97 C.I.Puryear, J.P.Castagna, Layer – thickness determination and stratigraphic interpretation using spectral inversion//Theory and application Geophysics – 2008 – Vol. 73 – №. 2
- 98 Marfurt, K. J., Kirlin R.L. Narrow – band spectral analysis and thin – bed tuning//Geophysics – 2001– 66 – P. 1274–1283.
- 99 Castagna J.P., Sun S., Siegfried R.W. 2003, Instantaneous spectral analysis: Detection of low-frequency shadows associated with hydrocarbons The Leading Edge №2