

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(СПбГУ)

Пальцев Илья Олегович

**Обработка и интерпретация данных сейсмоакустики в северной части
Карского моря с целью поиска опасных геологических процессов**

Магистерская диссертация
по направлению 05.04.01 «Геофизика»

«К ЗАЩИТЕ»
Научный руководитель:
к.г.-м.н., В.В. Половков

« » 2023

Санкт-Петербург
2023

АННОТАЦИЯ

Исследование посвящено разработке специализированного графа обработки, учитывающего специфические особенности сейсмоакустических исследований на акваториях.

Целью данной работы является обработка материалов сейморазведки сверхвысокого разрешения, полученных в Карском море, с применением современных технологий подавления кратных волн и волн-спутников для более однозначного сеймостратиграфического анализа и выделения опасных геологических объектов.

Исходя из поставленной цели, в магистерской диссертации произведено тестирование процедур и подбор оптимальных параметров на модельных и реальных данных.

Объем магистерской диссертации составляет 45 страниц, на которых размещены 27 рисунков и 1 таблица.

Ключевые слова: сейсмоакустика, кратные волны, граф обработки, волны-спутники, разрешающая способность, опасные геологические процессы и явления.

The main idea of the research is the development of a specialized processing graph that considers the specific features of high-resolution engineering marine seismic surveys.

The purpose of this work is to process the high resolution marine seismic surveys data obtained in the Kara Sea using modern technologies for suppressing multiple waves and ghosts for a more unambiguous seismostratigraphic analysis and identification of geohazards.

Based on the goal, in the master's thesis, procedures were tested and the optimal parameters were selected on model and real data.

The volume of the master's thesis is 45 pages, which contain 27 figures and 1 table.

Keywords: high-resolution marine seismic survey, multiple waves, processing graph, ghost waves, resolution, geohazards.

СОДЕРЖАНИЕ

АННОТАЦИЯ.....	2
ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА АКВАТОРИЯХ.....	6
1.1 Теоретические основы.....	6
1.2 Кратные волны.....	11
2 СПОСОБЫ ОСЛАБЛЕНИЯ КРАТНЫХ ВОЛН.....	14
2.1 Подавление кратных волн на этапе получения данных.....	14
2.1 Процедуры подавления кратных волн, основанные на разности кинематических свойств.....	15
2.3 Процедуры подавления кратных волн, основанные на периодичности.....	18
3 ДАННЫЕ И МЕТОДЫ.....	21
3.1 Методика работ.....	21
3.2 Типовой граф обработки.....	24
4 МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ ГРАФ ОБРАБОТКИ.....	29
4.1 Тестирование процедур на модельных данных.....	29
4.2 Тестирование процедур на реальных данных.....	34
4.4 Выбор процедур для модернизированного графа обработки.....	39
5 ТИПОВЫЕ ОПАСНЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ НА ИССЛЕДУЕМОМ УЧАСТКЕ РАБОТ.....	41
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	43
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	45

ВВЕДЕНИЕ

Летом 2022 года в акватории Карского моря состоялась научно-исследовательская экспедиция TTR-21 («Training Trough Research»). Одной из задач экспедиции являлось геолого-геофизическое картирование зон проявления опасных геологических процессов (ОГП). Комплекс работ включал в себя геологический пробоотбор, сейсморазведку сверхвысокого разрешения (ССВР), акустическое профилирование (АПр) и многолучевое эхолотирование. Данные ССВР оперативно обрабатывали по типовому графу. После чего на временных разрезах в комплексе с материалами других методов выделяли геологические объекты и выбирали точки для донного пробоотбора. Исходные данные ССВР были осложнены волнением моря, наличием кратных волн и волн-спутников, подавление которых в типовом графе не осуществлялось. Современные процедуры обработки данных ССВР позволяют учитывать эти особенности волнового поля, что приводит к повышению разрешающей способности, улучшению возможностей сеймостратиграфического анализа и более однозначному выделению геологических объектов.

Обработка данных сейсмоакустики должна учитывать особенности получаемых данных и в некоторых случаях, представляет собой итерационный процесс, состоящий из тестирования различных алгоритмов и выбора наиболее подходящих [4]. Поэтому, в ходе работы осуществлялся выбор процедур и подбор оптимальных параметров для эффективного подавления волн-помех, связанных со свободной поверхностью.

Для тестирования модулей подавления волн-спутников и кратных волн на первом этапе были подготовлены модельные данные с точно известным положением границ и заглублением оборудования. На втором этапе тестирование осуществлялось на части данных, полученных в рейсе, для более тонкой настройки. После чего, процедуры и параметры были применены ко всем реальным данным.

Целью данной работы является обработка материалов ССВР, полученных в Карском море, с применением современных технологий подавления кратных волн и волн-спутников для более однозначного сеймостратиграфического анализа и выделения опасных геологических объектов.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

Изучить литературу по теме исследования;

Освоить программное обеспечение по моделированию, обработке и интерпретации сейсмических данных (Tesseral, RadExPro, Kingdom);

Выполнить моделирование сейсмических данных с сигнатурой источника, приближенной к реальному импульсу;

Изучить технологии подавления кратных волн, связанных с поверхностью моря, основанные на моделировании кратных и последующем их адаптивном вычитании и успешно применить эти технологии к модельным данным;

Обработать реальные данные, на которых кратные волны накладываются на целевой сигнал, с использованием освоенных процедур подавления кратных волн.

1 СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА АКВАТОРИЯХ

1.1 Теоретические основы

Сейсмоакустические исследования проводятся для изучения структуры и морфологии морского дна, донных отложений и мониторинга их краткосрочного и долгосрочного поведения, для безопасного обустройства морских инженерных сооружений, таких как трубопроводы и буровые платформы. Методология и оборудование, используемые при морских и наземных исследованиях отличаются. Расхождения обусловлены целями исследований, различиями в глубине проникновения и разрешающей способности, принципами работы оборудования и полученной информацией [8].

Сейсмоакустические исследования отличаются высокой разрешающей способностью и обычно используются для решения инженерных задач или для составления карт опасных геологических процессов и явлений (ОГПиЯ), возникающих при строительстве морских сооружений.

Перед бурением морской скважины необходимо детально изучить морфологию поверхности, а также строение донных отложения в районе расположения скважины. Эту операцию часто называют обследованием участка. Поскольку разрешение обычных сейсмических данных 2D и 3D недостаточно для получения подробной информации о стратиграфии мелководья, для картирования ОГПиЯ, таких как оползни, чрезмерные наклоны морского дна, газовые шапки и газогидраты, активные разломы, то используются методы высокого разрешения, использующие сигналы более высокой частоты. Хотя одноканальные или многоканальные сейсморазведочные работы с искровым источником и маленьким удалением также используются для решения мелководных инженерных задач, традиционные многоканальные сейсморазведочные работы 2D и 3D в основном используются для разведки углеводородов специализированными геологоразведочными компаниями [8].

Морские геофизические методы для съемки объектов с высоким разрешением используют различные датчики для получения акустических сигналов в значительно широком частотном диапазоне. В таблице 1 приведена общая информация о диапазоне частот наиболее распространенных морских акустических систем.

Таблица 1. Характеристики сейсмических и сейсмоакустических методов [6]

Методы	Модификации	Диапазон рабочих частот //диапазон доминантных частот	Излучатель	Глубинность или просвечиваемые базы//разрешающая способность по вертикали
Сейсмологические и сейсмические методы				
Пассивная сейсморазведка	Сейсмологические наблюдения	0,1–40 Гц	Сейсмические воздействия	
МОВ ОГТ, МПВ, МАПВ	Стандартная сейсморазведка (СР) с буксируемыми или донными системами	15–150 Гц	Пневматический	Более 1000 м // 25 м
МОВ, МПВ, МАПВ, МВС	Сейсморазведка с донными многокомпонентными системами (СДМС)	5–500 Гц	Пневматический Электронскровой	Более 100 м// в зависимости от метода
Сейсмоакустические методы				
МОВ ОГТ, МПВ	Сейсморазведка высокого разрешения (СВР)	50–500 Гц //75–300 Гц	Пневматический Электронскровой	До 500–1000 м // 2–10 м
МОВ ОГТ	Сейсморазведка сверхвысокого разрешения (ССВР)	150–1500 Гц // 250–800 Гц	Пневматический Электронскровой	До 100–200 м, // 1–5 м
МОВ ОГТ	Сейсморазведка ультравысокого разрешения (СУВР)	250–2500 Гц // 750–2000 Гц	Пневматический Электронскровой Электродинамический	До 10–50 м //0,1–2 м
МОВ ЦЛ (Т₀)	Непрерывное сейсмоакустическое профилирование (НСП) в низкочастотной (НЧ НСП) или высокочастотной (ВЧ НСП) модификациях	50–700 Гц // 150–500 Гц, 150–2500 Гц // 500–1500 Гц	Электронскровой Электродинамический	До 100 м //0.5 м

Наиболее подходящий метод с соответствующей частотой выбирается с учетом таких факторов, как требуемая информация, разрешающая способность и целевые объекты. Относительно низкочастотные сигналы, используемые при сейсморазведке, генерируются пневматическими пушками (обычно между 15 и 200 Гц) или искровыми источниками (от 50 до 800 Гц), в то время как высокочастотные акустические сигналы примерно от 3 до 800 кГц генерируются в толще воды специальными приборами. Эти приборы преобразуют один тип энергии (например, электрический сигнал) в другой (например, акустический сигнал) или наоборот. В преобразователях используются пьезоэлектрические кристаллы, изготовленные из керамического материала, которые вибрируют при возбуждении электрическим импульсом. Эти колебания передаются в

толщу воды в виде волн давления (Р) для генерации акустического сигнала. Этот же преобразователь также используется для приема отраженных сигналов и преобразования их в электрический сигнал для последующей обработки и построения графиков [8].

Наиболее важным параметром сбора данных для таких морских геофизических систем высокого разрешения является частота сигнала. Разрешающая способность и глубина проникновения этих различных типов акустических методов сильно зависят от частоты сигнала, которую они используют. Несмотря на то, что глубина их проникновения ограничена, системы, использующие высокочастотные сигналы, как правило, обеспечивают более высокое разрешение данных для той же морфологии морского дна и донных отложений, чем низкочастотные системы.

Обычные одно- и многоканальные методы сейсморазведки используют акустические сигналы гораздо большей амплитуды в относительно более низких частотных диапазонах. Следовательно, они имеют гораздо большую глубину проникновения, но их разрешающая способность относительно ниже. Сегодня традиционная сейсморазведка является основным инструментом для разведки углеводородов на шельфе, составления карт мелководной и глубинной стратиграфии и определения структурных параметров.

Если мы установим приемник рядом с сейсмическим источником и начнем запись сейсмических событий после каждого возбуждения, мы получим сейсмограммы нулевых удалений, при перемещении этой системы вдоль прямой линии наблюдения. Геометрия сбора данных, очень похожая на эту конфигурацию, до сих пор используется в морских исследованиях и известна как одноканальное сейсмическое профилирование. Хотя и предполагается, что это система наблюдений с нулевым удалением, всегда существует некоторое смещение между источником и приёмником из-за условий безопасности, поскольку энергия источника может повредить приёмное оборудование. После каждого возбуждения амплитуды отраженных сигналов, принятых одноканальной косой, передаются на сеймостанцию. Эти амплитуды оцифровываются на аналогово-цифровом преобразователе и записываются на электронный носитель, образуя сейсмограммы равных удалений (рис. 1 А). При одноканальном получении данных можно получить предварительное отображение стратиграфии дна во время записи, поскольку построение сейсмических трасс выполняется в режиме реального времени [8].

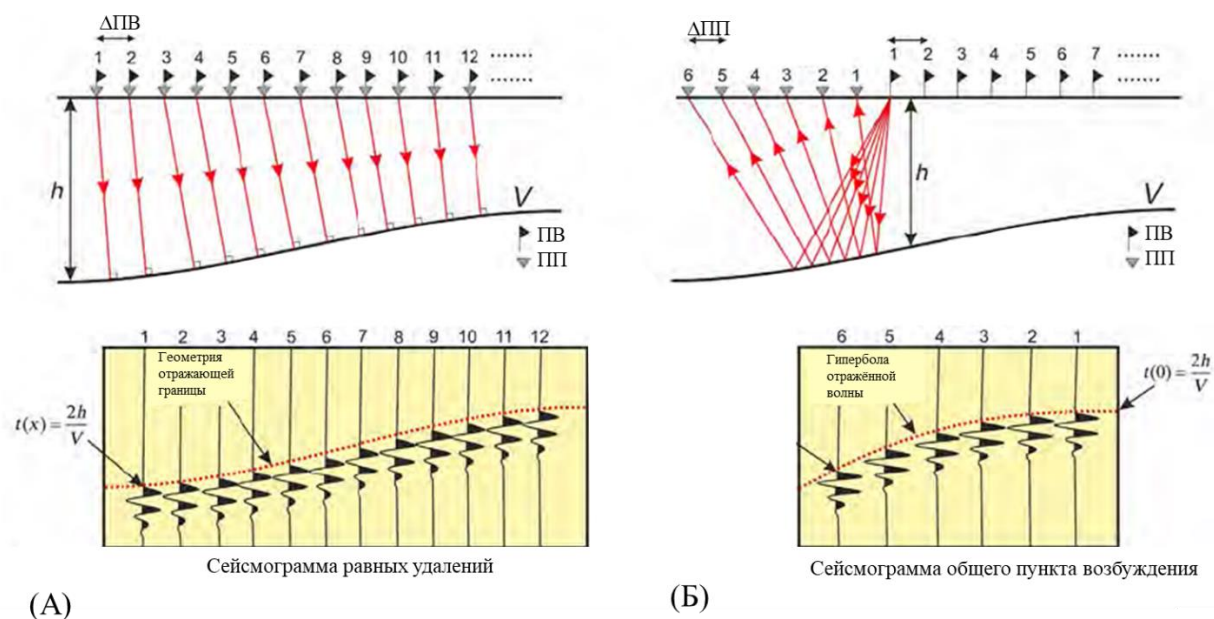


Рисунок 1. Схема сейсмических наблюдений [8]

А – одноканальные, Б – многоканальные

Для одноканального сбора данных могут использоваться различные сейсмические источники с различными частотными и амплитудными характеристиками. Наиболее распространенным одноканальным сейсмическим источником является спаркер, который использует разряд чрезвычайно высокого электрического напряжения для создания импульсного сигнала в толще воды. Одноканальный сбор данных относительно прост и более экономичен с точки зрения используемого оборудования и методологии сбора данных по сравнению с многоканальным сбором данных. Обработка одноканальных данных также менее сложна. Однако эти наблюдения не позволяют получить распределение подповерхностных скоростей в 1D или 2D, поскольку у нас есть только информация о времени прихода отражений. Так как время прихода конкретного отражения зависит от глубины отражающей границы и скорости распространения, и поскольку мы не можем знать глубину отражающих границ, вызывающих зарегистрированные отражения, мы не можем получить сейсмические скорости в пластах с помощью одноканальной сейсморазведки.

Применение одноканального сбора данных ограничено инженерными изысканиями перед возведением инженерных сооружений на акваториях. Сегодня современные морские сейсмические данные собираются с некоторым удалением между источником и несколькими каналами записи, расположенными в пределах одного (2D-прием) или нескольких (3D-прием) сейсмокос. Удаление – это расстояние между местоположением источника и каждым каналом записи. При многоканальных системах наблюдения расстояния удаления каждого канала различны, и в целом они регулярно

увеличиваются по мере удаления от местоположения источника вдоль сейсмокося. Использование многоканальных систем наблюдения с различными удалениями обеспечивает ряд преимуществ, таких как:

- Возможность проведения анализа скоростей для получения скоростной модели по многоканальным сейсмическим данным;
- Процесс суммирования подавляет большую часть случайного и значительного количества когерентного шума;
- Кратные волны могут быть подавлены с помощью различных подходов, использующих сейсмограммы ОСТ;
- Изменения амплитуды с увеличением удалений могут указывать на подземные скопления углеводородов.

При многоканальной сейсморазведке в качестве необработанных сейсмических данных получают определенные группы трасс, называемые ансамблями, и, следовательно, во время сбора невозможно получить стратиграфию дна, поскольку многоканальные сейсмические данные требуют различных дополнительных этапов обработки данных для получения структуры недр (рис. 1 Б) [8].

После ввода кинематических поправок и суммирования многоканальные сейсмические данные также становятся смещенными к нулю, поскольку коррекция устраняет смещения между источником и приемниками при сборе данных ОСТ. Эффект суммирования повышает качество данных и сейсмическое изображение имеет гораздо более высокое соотношение сигнал/шум. В качестве примера на рисунке 2 сравниваются два профиля, полученных по одно- и многоканальным сейсмическим данным вдоль одной и той же линии двумерной съемки.

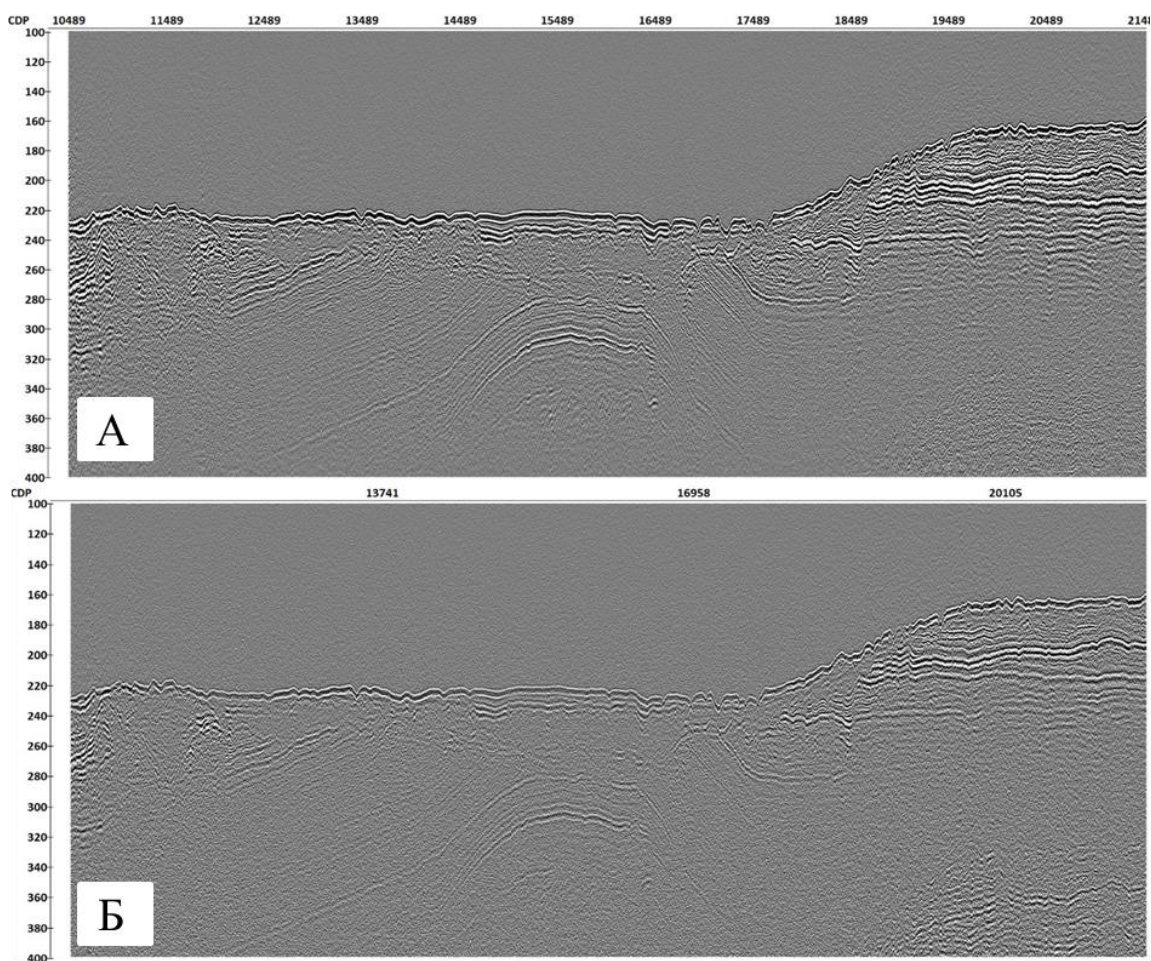


Рисунок 2. Временные разрезы

А – полученный по многоканальным данным, Б – полученный по одноканальным данным

1.2 Кратные волны

Материалы, полученные при инженерных сейсмоакустических исследованиях, могут быть осложнены интенсивным полем кратных волн, что осложняет волновую картину и приводит к неоднозначности интерпретации данных. Кратные волны возникают, когда сейсмический сигнал проходит по одной и той же траектории луча более одного раза, что приводит к появлению повторяющихся отражений. Эти отражения могут представлять собой серьезные проблемы, особенно при съемках на мелководье. Поскольку морское дно является контрастной границей с относительно высоким коэффициентом отражения, оно отражает значительную часть поступающей сейсмической энергии к поверхности моря. Затем происходит обратное отражение к морскому дну, поскольку граница воздух-поверхность моря также является контрастной.

Этот сигнал будет действовать как вторичный сейсмический источник, создавая свои собственные отражения от морского дна и неглубоких донных отложений. Этот процесс отражения может повторяться в данных несколько раз в зависимости от глубины воды, силы источника и продолжительности записи, и все эти отражения принимаются гидрофонами и записываются в сейсмические данные [8].

Время прибытия первого кратного отражения от морского дна ровно удвоенному времени однократного отражения (рис. 3).

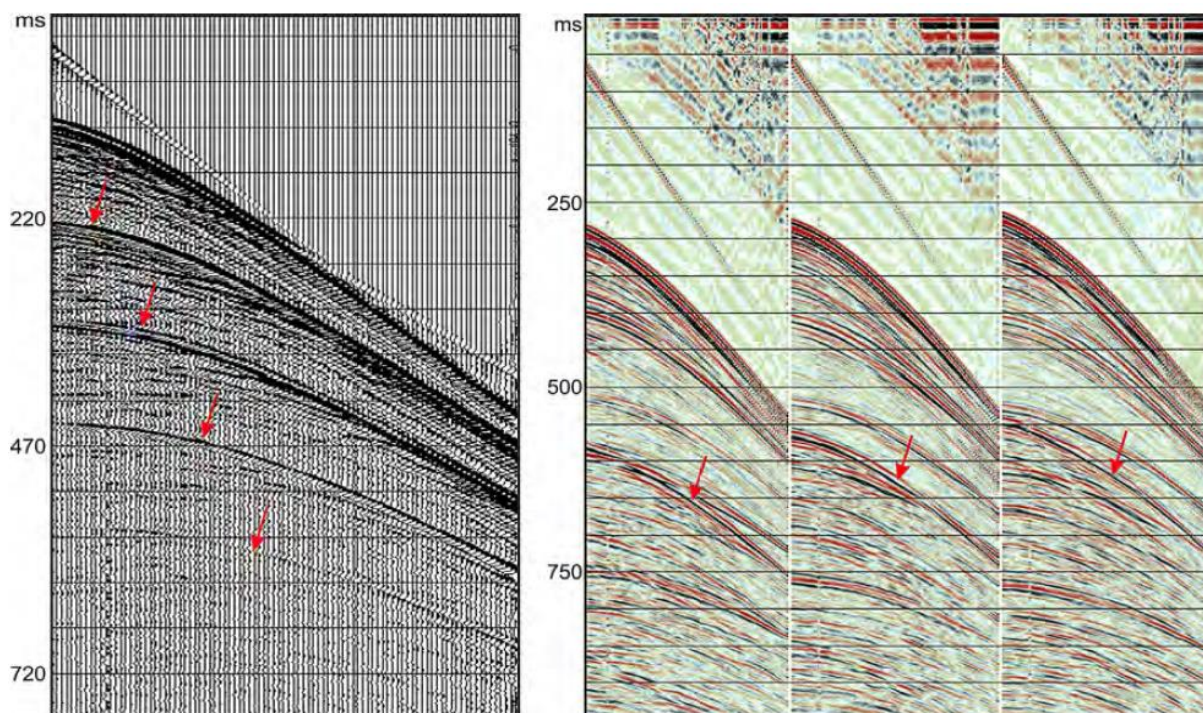


Рисунок 3. Гиперболы кратных волн (красные стрелки) на сейсмограммах ОПВ [8]

Если морское дно наклонено, то наклон кратных отражений увеличивается (рис. 4).

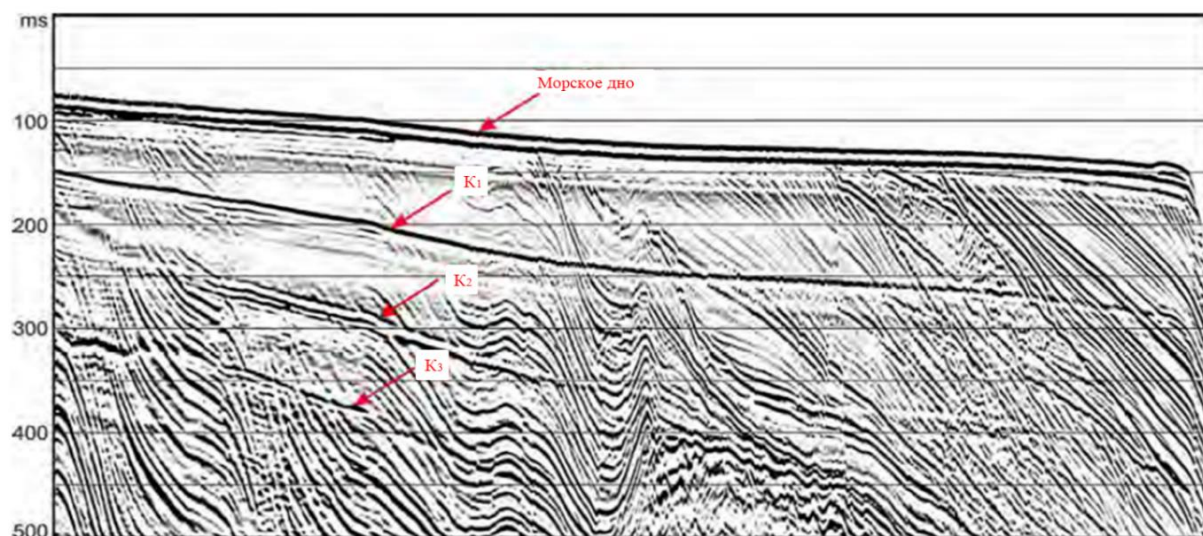


Рисунок 4. Наклоны последовательных кратных отражений (K_1 , K_2 и K_3) увеличиваются на сейсмическом разрезе при наклоне морского дна [8]

В большинстве случаев повторяющиеся амплитуды – это не только энергия морского дна, но и отраженная энергия от донных отложений, повторяющаяся в виде полного пакета отражений. Иногда амплитуды многократных отражений настолько велики, что амплитуды первичного отражения полностью маскируются.

Множественные отражения распространяются в основном в толще воды и в неглубоких донных отложениях; следовательно, скорость их распространения составляет приблизительно 1500 м/с. Однократные отражения могут накладываться на кратные, однако они почти всегда имеют более высокие скорости, чем кратные. Гиперболы кратных волн пересекают гиперболы однократных, поскольку скорость распространения сигнала напрямую влияет на кривизну гипербол отражения [8].

Избежать регистрации кратных волн на этапе сбора данных не всегда возможно, поэтому был разработан ряд специфических процедур обработки для устранения помех этого типа.

2 СПОСОБЫ ОСЛАБЛЕНИЯ КРАТНЫХ ВОЛН

Существует два подхода к проблеме подавления кратных волн. Первый реализуется на этапе получения данных и включает в себя следующие приёмы:

- использование погружных приёмных устройств;
- совместное использование пьезокос и обычных сейсмоприёмников, регистрирующих вертикальную компоненту волнового поля.

Второй подход основан на последующей обработке данных и использует следующие особенности кратных волн:

- отличие формы годографа многократных и однократных волн;
- периодичность времён вступления кратных волн [7].

2.1 Подавление кратных волн на этапе получения данных

Использование погружных приёмных устройств применяется для ослабления волн-спутников, связанных со свободной поверхностью. В случаях, когда мощность целевого интервала исследований не превышает глубину воды, имеет смысл максимально заглубить приёмно-излучающую систему, чтобы волны-спутники регистрировались на временах, превышающих время прихода полезных однократных волн. Если глубины подобраны правильно, то однократные волны будут зарегистрированы вне области интерференции [7].

Другим приёмом подавления кратных волн на этапе получения данных является синхронный приём волнового поля давлений и вертикальной компоненты смещения. Приемник давления, помещенный в водную толщу, всегда регистрирует интерференционное волновое поле, складывающееся из волн, подходящих к приемнику снизу и сверху (отражения от свободной поверхности). Как известно, приемники скорости смещения, в отличие от гидрофонов, реагируют на направление подхода волны, и знак принятого сигнала будет зависеть от направления подхода. Следовательно, для гидрофона волны, отраженные от дна и от свободной поверхности, будут иметь различную полярность, а для геофона в этом случае полярность этих волн будет одной и той же. Инверсия фазы, связанная с отражением от свободной поверхности воды, компенсируется в случае приема скорости смещения переверотом фазы за счет изменения направления подхода волны. Для подавления волн, связанных со свободной поверхностью, осуществляется суммирование сигналов с геофона и гидрофона [7].

2.1 Процедуры подавления кратных волн, основанные на разности кинематических свойств

К способам подавления кратных волн на этапе обработки, основанным на разности кинематических свойств, относится суммирование по методу общей глубинной точки (рис. 1).

В основе данного способа лежит предположение о росте скорости распространения волн с глубиной (рис. 5 Б). В этом случае при близких значениях t_0 годографы кратных волн будут характеризоваться большей кривизной, чем однократных, а, следовательно, большими кинематическими поправками (рис. 5 А). При суммировании сейсмотрасс по методу ОГТ эффект ослабления волн-помех достигается за счет того, что после ввода кинематических поправок для полезных волн их годографы становятся горизонтальными линиями, а годографы волн-помех имеют остаточную кривизну, которая тем больше, чем больше отличаются скорости распространения полезной волны и волны-помехи (рис. 5 В).

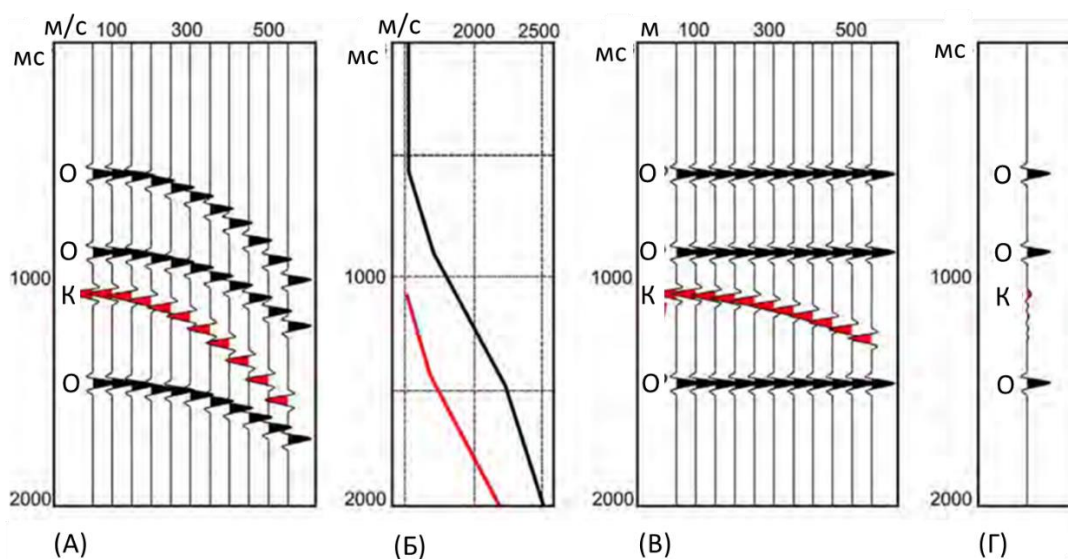


Рисунок 5. Принцип суммирования по ОГТ [8]

А – Сейсмограмма ОГТ, включающая три однократных (О) и одно многократное (К) отражение, Б – функция скорости для однократных (черный) и многократных (красный) отражений, В – сейсмограмма ОГТ после ввода кинематической поправки, Г – подавление кратной волны на суммированной трассе

При синхронном сложении горизонтальные оси синфазности складываются в фазе и интенсивность суммарной волны на суммотрассе увеличивается, а недоспрявленные или переспрявленные оси синфазности волн-помех, складываются не

синфазно, их интенсивность не увеличивается, и соотношение сигнал, помеха возрастает (рис. 5 Г) [2].

У этого подхода существует ряд проблем. Во-первых, точность кинематических поправок осложнена влиянием наклонов границы, повышающих кажущуюся скорость годографов. Во-вторых, при сейсмоакустических исследованиях часто используют короткие базы наблюдения, а на малых удалениях формы годографов однократных и многократных волн уже достаточно пологие и эффективность суммирования снижается.

К другим приёмам подавления кратных волн, основанным на отличие формы годографа многократных и однократных волн, относятся пространственно-временная (F-K) фильтрация и преобразование Радона.

Подавление кратных волн путем F-K фильтрации может осуществляется следующим образом (рис. 6):

- вводятся кинематические поправки, рассчитанные для скорости, многократных волн (рис. 6 Б);

- к данным применяется прямое двумерное преобразование Фурье (переход в плоскость F-K – «частота-волновое число», в результате чего на этой плоскости однократные волны окажутся в положительном квадранте, а кратные будут лежать на вертикальной оси (рис. 6 В);

- процедура мьютинга применяется к области, лежащей на вертикальной оси;

- обратное двумерное преобразование Фурье – переход в x-t (рис. 6 Г);

- устранение введенных ложных кинематических поправок (рис. 6 Д);

- ввод правильных кинематических поправок, рассчитанных со скоростями однократных волн [7].

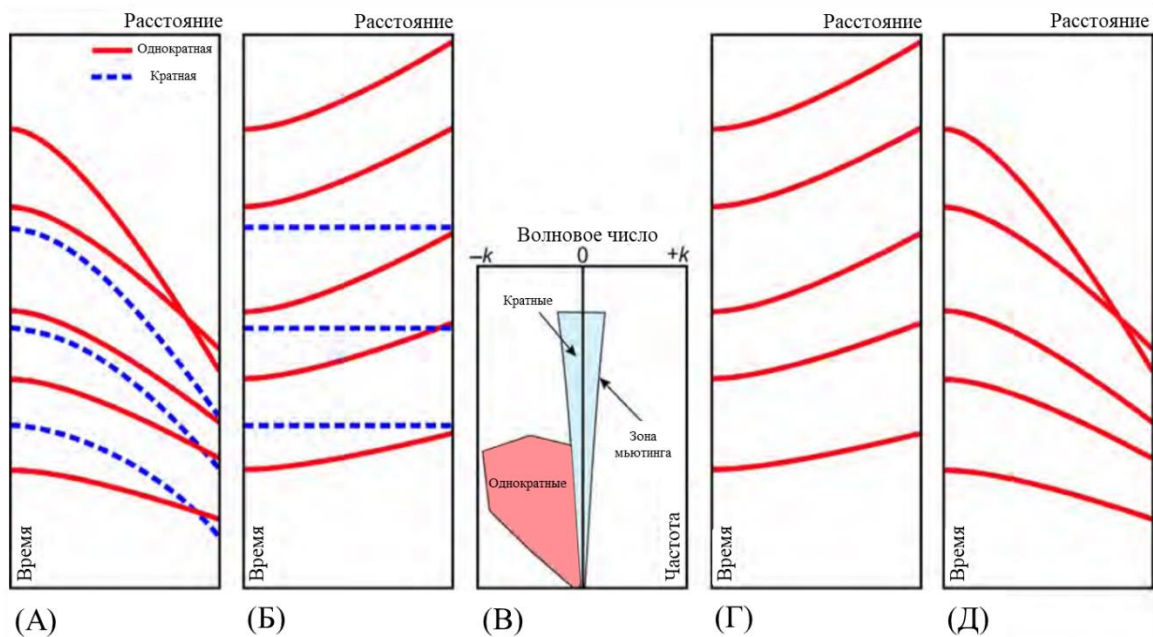


Рисунок 6. Один из способов подавления кратных волн с помощью f-k фильтрации [8]
 А – сейсмограмма ОСТ с однократными (красный) и многократными (пунктирно-синий) отражениями, Б – после ввода кинематической поправки, рассчитанной для скорости в воде, В – сейсмограмма ОСТ в F-K плоскости, Г – сейсмограмма ОСТ после обратного 2D – преобразования Фурье, Д – исходная сейсмограмма после подавления кратных волн

Данный способ также оказывается малоэффективным в случае наблюдений на акваториях, где многократные волны слабо отличаются как по спектральному, так и по скоростному составу.

Преобразование Радона переводит сейсмограмму в функцию новых переменных – p и τ . Линейное преобразование Радона заключается в интегрировании значений волнового поля по произвольным прямым с углами наклона p_i и нормальными временами τ_i [1].

Линейное преобразование радона отображает прямую линию в пространственно-временной области в точку в линейной области Радона. Кроме того, гиперболическое событие в (x, t) области принимает форму эллипса в линейной области Радона. Параметр максимального луча, связанный с сейсмическим событием в линейной области радона, зависит от максимального наклона в пространственно-временной области. Этот максимальный наклон в пространственно-временной области связан со скоростью сейсмических волн: чем ниже скорость, тем больше наклон и тем больше лучевой параметр в τ - p области. Параметр луча определяется как наклон касательной линии вдоль события в пространственно-временной области.

Подавление кратных волн может осуществляться мьютингом в пространстве (р, τ) или за счет предсказывающей деконволюции.

2.3 Процедуры подавления кратных волн, основанные на периодичности

Вторая группа методов основана на строгой периодичности кратных волн, что позволяет, в общем случае, предсказать их появление и затем вычесть из наблюдаемого волнового поля. Эти методы ориентированы на одноканальные данные, либо на данные после суммирования [7].

Методы этой группы можно разделить на детерминистические и статистические. Все они предложены применительно к следующим условиям: среда представляет собой горизонтально-слоистое полупространство, покрытое водным слоем, отражающие границы плоские, коэффициент отражения от свободной поверхности постоянен и равен 1; источник и приемник совмещены, волны – плоские (либо потери на геометрическое расхождение скомпенсированы), потери на поглощение и прохождение – пренебрежимо малы.

Суть детерминистической деконволюции состоит в том, что частотная характеристика отраженного сигнала (трассы) делится на частотную характеристику исходного импульса (т.е. приемно-регистрирующего канала). В идеале, при этом должна получиться частотная характеристика среды, которая при переводе во временную область даст на выходе разрез коэффициентов отражения. На практике в силу ряда причин это невозможно, однако детерминистическая деконволюция позволяет существенно сузить сигнал, повышая разрешающую способность данных [5].

Подавление реверберационных волн с помощью оператора предсказывающей деконволюции осуществляется следующим образом: значение сейсмотрассы умножается на величину коэффициента отражения от дна, сдвигается на величину временной задержки в водном слое, и полученная трасса вычитается из исходной. Результат дереверберации может быть записан следующим образом :

$$p_0(t) = p(t) + r_1 p(t - \Delta\tau) = [\delta(t) + r_1 \delta(t - \Delta\tau)] * p(t) \quad (1)$$

где $p_0(t)$ – свободная от реверберации трасса, r_1 – коэффициент отражения от дна, $\Delta\tau$ – временная задержка.

Основная проблема – время пробега кратных в воде волн и коэффициент отражения от дна могут существенно меняться по латерали, влияние волнения на малой воде значительно сильнее сказывается на разбросе значений времен вступления донной и кратной волн.

В основе метода статистической предсказывающей деконволюции лежат следующие предположения:

- коэффициенты отражения представляют собой случайную некоррелированную последовательность;
- сигнал, формирующий сеймотрассу, является минимально-фазовым;
- сеймотрасса представляет собой результат свертки стучайной стационарной последовательности коэффициентов отражения с минимально-фазовым сигналом.

Оператор предсказания даёт возможность по значениям исходной трассы дать оценку её будущих значений. Если принять интервал предсказания равным двойному времени пробега в воде, можно считать, что оператор предсказания позволяет оценить по начальной части сеймотрассы поле многократных волн в водном слое. Для получения окончательного результата необходимо вычесть из исходной сеймотрассы предсказанное поле реверберационных волн, либо вычислить оператор ошибки предсказания, результатом применения которого к сейсмограмме должна стать её непериодическая часть.

Положения, лежащие в основе метода статистической предсказывающей деконволюции могут не выполняться в условиях мелководья, что зачастую приводит к его неэффективности.

Наиболее востребованными техниками подавления кратных волн при обработке морских инженерных данных являются «Zero-offset demultiple» для одноканальных и «SRME» для многоканальных данных [4]. Суть алгоритма «SRME» заключается в том, что модель кратных волн для каждой трассы получается путем пространственной свертки сейсмограммы ОПВ и ОПП, к которым данная трасса относится. В результате получается трасса, содержащую все кратные волны, которые в последующем адаптивно вычитают из исходной трассы [9].

Модуль «Zero-offset demultiple» предназначен для подавления кратных волн на одноканальных или суммированных данных, полученных при небольших выносах источник-приемник. Алгоритм, реализованный в модуле, основан на адаптивном вычитании модели кратных волн из исходного волнового поля. Модель кратных волн формируется из самих данных двумя способами: статическим сдвигом исходных трасс на заданное время, либо при помощи свертки трассы с самой собой (автосвертка) [5]. Адаптивное вычитание модели кратных волн позволяет избавиться от нежелательной энергии, не затрагивая при этом однократных отражений [3]. Сформулировать основные принципы работы алгоритма можно следующим образом:

- Для каждой трассы на основе исходных и модельных данных конструируется формирующий фильтр, минимизирующий результат вычитания модели кратных из исходного поля;

- Фильтр находит похожие отражения, которые присутствуют и на исходных данных, и в модели кратных волн, и минимизирует их среднеквадратические амплитуды в результирующем поле;

- В процессе расчета фильтра вводится дополнительная нестационарность, позволяющая ему адаптироваться к событиям, которые похожи, но не являются в точности одинаковыми [5].

Подавление короткопериодных кратных волн будет осуществляться с использованием модуля «DeGhosting». Он предназначен для подавления волн-спутников на одноканальных или суммированных данных, полученных при небольших выносах источник-приемник. Алгоритм, реализованный в модуле, основан на адаптивном вычитании модели волны-спутника из исходного волнового поля. Модель кратных волн формируется из самих данных статическим сдвигом исходных трасс на заданное время. Для каждой трассы на основе исходных и модельных данных конструируется формирующий фильтр, минимизирующий результат вычитания модели волн-спутников из исходного поля. Фильтр находит похожие отражения, которые присутствуют и на исходных данных, и в модели волн-спутников, и минимизирует их среднеквадратичные амплитуды в результирующем поле. В процессе расчета фильтра вводится дополнительная нестационарность, позволяющая ему адаптироваться к событиям, которые похожи, но не являются в точности одинаковыми. До определенной степени это позволяет алгоритму вычитания эффективно работать даже с приближительными моделями волн-спутников, в которых времена прихода и амплитуды отражений несколько отличаются от наблюдаемых. Однако, чем ближе модель волн спутников к реально наблюдаемым волнам-спутникам, тем лучше она будет вычитаться. Поэтому, наилучшего результата можно добиться при минимальных расстояниях источник-приемник, т.к. при нулевом выносе получается наиболее точная модель. По тем же причинам, модуль работает менее эффективно, если данные существенно нарушены волнением моря [5].

3 ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

3.1 Методика работ

В рейсе проводилась сейсморазведка сверхвысокого разрешения (ССВР) по методу отраженных волн в модификации общей глубинной точки (МОВ-ОГТ), которая заключается в многократном перекрытии участка отражений парами источник-приемник с различными удалениями, что достигается при передвижении фланговой системы наблюдения таким образом, чтобы между пунктами взрыва расстояние было меньше, чем длина активной линии приема.

При благоприятных условиях методика МОВ-ОГТ позволяет решить следующие задачи:

- подавить кратные волны;
- усилить полезные отражения и ослабить помехи путем суммирования нескольких сеймотрасс на каждой ОГТ;
- измерить пластовые скорости.

Измерение пластовых скоростей реализуемо при глубинах, соизмеримых с длиной активной линии приема.

Исходя из геологического строения района работ, глубины исследуемых горизонтов и трудоемкости спускоподъемных операций работы реализовались по трем системам наблюдений:

1 источник и 1 коса

Большую часть съемки проводилась с применением данной системы наблюдения. Это было обосновано минимальными временными затратами на спускоподъемные операции, минимальный радиус разворота судна (уменьшение времени циркуляции), жесткая связь источника и приемника упрощает процесс обработки (особенно в плохую погоду), качество собираемых данных обеспечивает выполнение задачи изучения ВЧР. В таком случае применяется постоянный скоростной закон, по которому производится суммирование. Схема системы наблюдения представлена на рисунке 7.

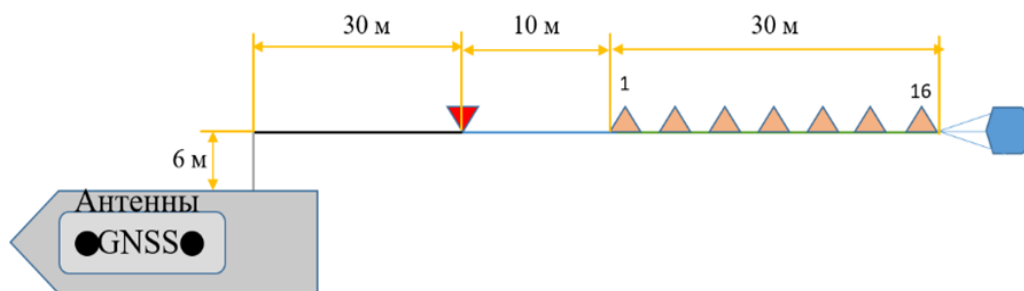


Рисунок 7. Система наблюдения (вид сверху)

1 источник и 2 косы

Использование второй косы обеспечивает получение отражений на больших удалениях, что позволяет проводить скоростной анализ, с помощью которого более корректно вводятся кинематические поправки для суммирования. Также скоростной анализ необходим для определения пластовых скоростей. Длина активной расстановки составляет 70 м, что позволяет производить скоростной анализ на глубинах до 70-80 метров. Схема системы наблюдения представлена на рисунке 8.

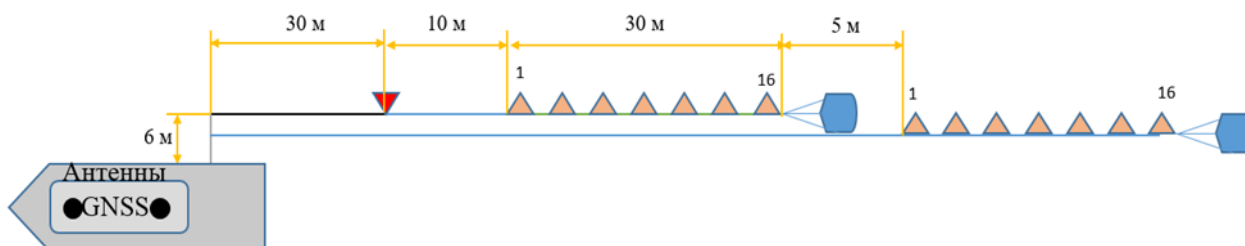


Рисунок 8. Система наблюдения (вид сверху)

2 источника и 2 косы

Использование двух источников высокой и низкой частоты позволяет дать более четкий сейсмический разрез: низкочастотный источник обеспечивает необходимую глубинность съемки, а высокочастотный повышает детальность ВЧР. Частоты спаркеров: 220 и 600 Гц. Схема системы наблюдения представлена на рисунке 9.

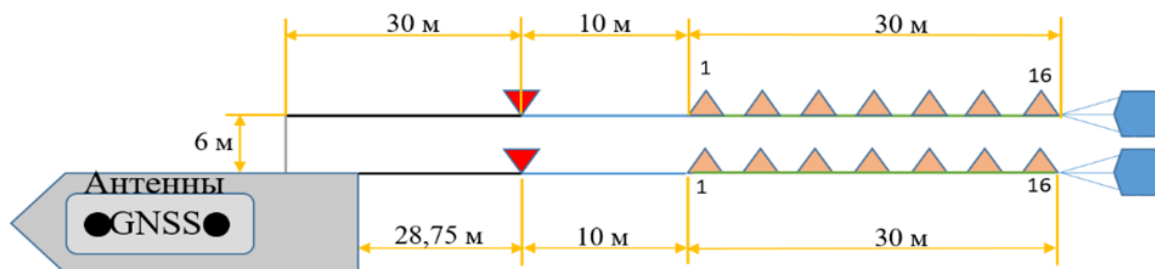


Рисунок 9. Система наблюдения (вид сверху)

Буксировка забортного оборудования осуществлялась с использованием

поворотного выстрела длиной 6,5 метров, установленного на правом борту судна. В рабочем положении выстрел отводился перпендикулярно борту и закреплялся двумя тросовыми оттяжками. Использование выстрела позволяет значительно уменьшить влияние кильватерной струи судна.

Для определения параметров сейсмической съемки были проведены опытно-методические работы (ОМР).

Поскольку при работах на акватории возможно возбуждение только продольных волн давления, источники таких волн необходимо размещать на некоторой глубине под поверхностью воды. Такое расположение приводит к образованию волн-спутников, интерферирующих с полезным сигналом ослабляя или усиливая его, и увеличивающих общую длительность согласованного сигнала (Рисунок 10). Для того, чтобы сигнал, приходящий на приемник, был максимально высокоамплитудным и наименее продолжительным, заглублиение источника и приемника должны быть подобраны на основе центральной части излучателя. Оптимальное заглублиение, обеспечивающее конструктивную интерференцию сигнала при минимальной длине, равняется четверти длины волны.

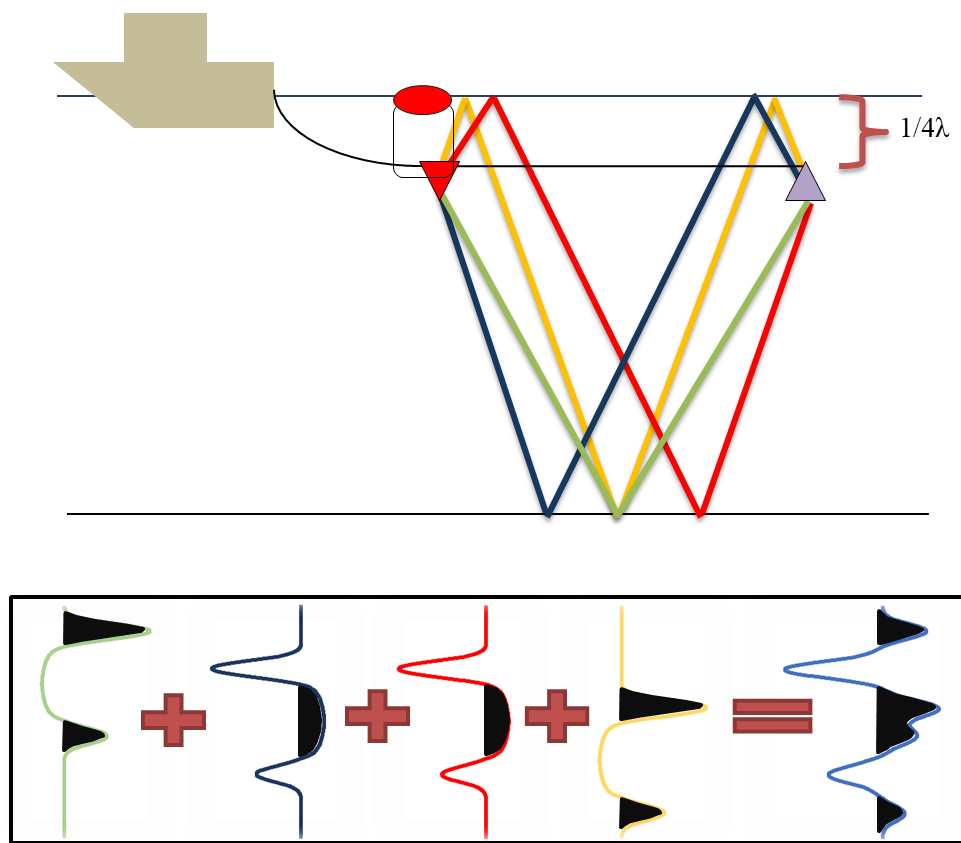


Рисунок 10. Получение формы регистрируемого сигнала

Для расчета заглублиения источника и приемника были определены центральные

частоты спаркера, равные 220 и 600 Гц. Таким образом, заглубление составляет 1,6 и 0,6 м. В соответствии с этими параметрами были собраны спаркерные плотики.

В процессе ОМР проводился выбор рабочей энергии возбуждения. Большая часть съемки проводилась с энергией 4 кДж при 58 электродах. По мере выгорания электродов энергия снижалась до 3,5 кДж для сохранения центральной частоты.

Съемка осуществлялась со скоростью судна 6 узлов, что обеспечивало шаг между пунктами возбуждения около 3 м.

3.2 Типовой граф обработки

В ходе рейса TTR-21 контроль качества и набортная обработка полевых сейсмических данных производилась в ПО обработки сейсмических материалов «RadExPro 2022.1».

Для обработки сейсмических материалов МОВ ОГТ использовался стандартный граф обработки, представленный на рисунке 11. Процедура обработки сейсмических записей начиналась с загрузки данных в обрабатывающую систему. Далее происходило присвоение геометрии и выполнялся контроль качества данных. После сейсмические материалы подвергались дальнейшей обработке.

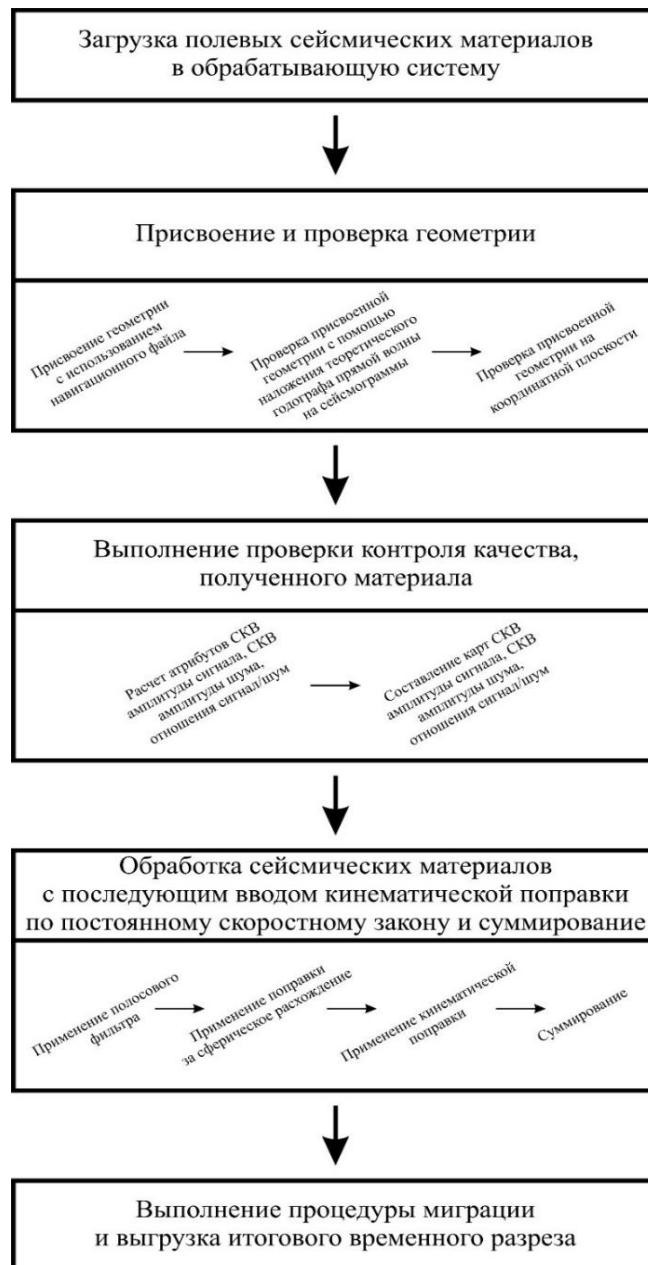


Рисунок 11. Стандартный граф обработки ССВР

Стоит отметить, что граф обработки зависит от используемой системы наблюдений. Однако общие принципы обработки можно проследить на примере профиля, где использовалась система наблюдения с двумя косами и одним источником.

Загрузка полевых материалов в формате SEG-D

Загрузка полевых материалов в обрабатывающую систему выполнялась с помощью потока, состоящего из модулей «SEG-D Input», «Trace output».

В модуле «SEG-D Input» выбиралась папка, где находятся полевые сейсмические записи. В модуле задавалось правило, по которому выполнялось присвоение заголовков из исходных материалов.

Присвоение и проверка геометрии

Присвоение и проверка геометрии производилась в одном потоке в два этапа. Сначала использовался модуль «Marine Geometry Input*». В модуле выбирался необходимый набор данных, навигационный файл, дата выполнения профиля и параметры используемой системы наблюдений. Далее выполнялась проверка введенной геометрии. Рассчитывался теоретический годограф прямой волны со скоростью распространения упругих колебаний в воде, после чего выполнялось наложение расчетного годографа на полученные сейсмограммы (рис. 12). Использованные значения скорости получались с датчика скорости звука, расположенного у антенны МЛЭ. Данные действия осуществлялись с помощью модулей «Trace Input» (сортировка CHANNEL_SET:FFID:CHAN), «Trace Header Math» (формула PICK1=OFFSET/1.46) и «Screen Display».

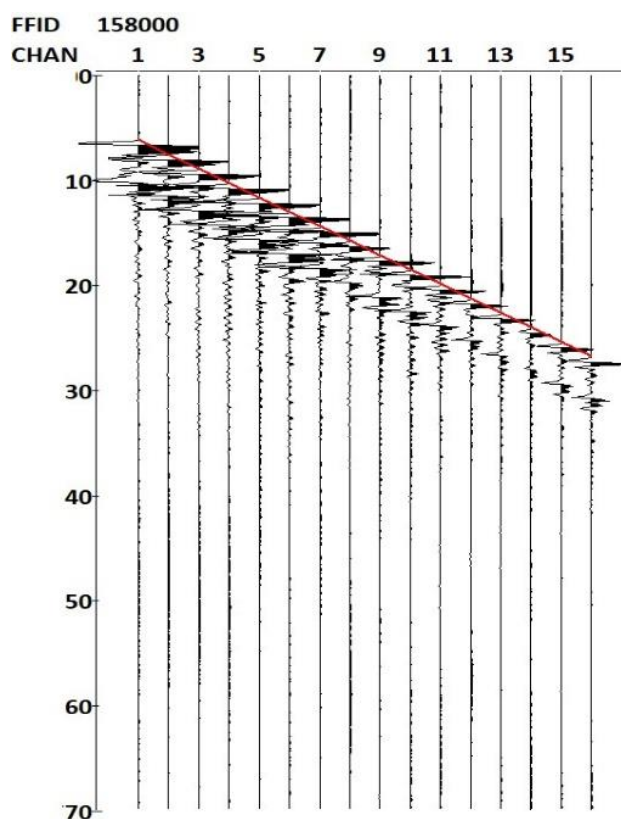


Рисунок 12. Пример сейсмограммы с наложенным расчетным годографом прямой волны со скоростью 1,46 км/с (красная линия)

Далее выполнялась проверка присвоенной геометрии на координатной плоскости с помощью модуля «CrossPlot*». В модуле выводился график положений источников, приемников и точек ОГТ на единой координатной плоскости.

Стоит отметить, что для профилей, где использовалась методика съемки с двумя сейсмокосами и одним источником, использовался дополнительный поток. Целью потока

являлось объединение наборов данных с двух кос и перенумерация точек ОГТ.

Если съёмка на профиле выполнялась с использованием одной сейсмокоды и одного источника, использовался один модуль «Marine Geometry Input*» и не использовался дополнительный поток ввода геометрии.

Контроль качества данных

Процедуры контроля качества выполнялась в три этапа. На первом этапе выполнялась автоматическая пикировка отраженного сигнала от дна. Для корректного выполнения процедуры пикировки использовалась грубая обработка сигнала (жесткий полосовой фильтр и введение поправки за сферическое расхождение).

На втором этапе рассчитывались атрибуты среднеквадратичной амплитуды сигнала, среднеквадратичной амплитуды шума по заданным окнам и соотношение сигнал/шум. Для этого дважды использовался модуль «SSAA» и модуль «Trace Header Math». Значение первого атрибута записывалось в заголовок SOU_SLOC, второго – в REC_SLOC, третьего – в PICK2.

На третьем этапе выполнялась визуализация карт рассчитанных атрибутов с помощью модуля «CrossPlot*».

Обработка сейсмического сигнала с последующим вводом кинематических поправок и суммированием

Сигнальная обработка сейсмических материалов, ввод кинематических поправок и суммирование выполнялись в одном потоке.

При рассмотрении сейсмограммы и её АЧХ выбирались параметры полосового фильтра для подавления низкочастотного шума и других случайных шумов. Для фильтрации использовался модуль «Bandpass Filter». После вводилась поправка за сферическое расхождение с помощью модуля «Amplitude Correction». Использовался коэффициент 1.

С помощью модуля «NMO/NMI» выполнялся ввод кинематических поправок с постоянным законом (1.46 км/с или с другими значениями скорости упругих волн в воде). Модуль «Ensemble Stack» суммировал полученные сейсмограммы ОГТ.

Миграция и выгрузка материалов в формате SEG-Y

Выполнение процедуры миграции и выгрузка итогового сейсмического разреза также выполнялась в одном потоке.

Процедура миграции выполнялась с помощью модуля «Stolt F-K Migration». Скорость миграции задавалась равной скорости распространения упругих колебаний в воде (1.46 км/с). Расстояние между трассами задавалось равным размеру площадки ОГТ (5 м). Максимальная частота, участвующая в формировании изображения, была равна

5000 Гц. Остальные параметры задавались по стандартным значениям.

Перед выгрузкой материалов для передачи разрезов на интерпретацию происходила передискретизация записи на 0.25 мс с помощью модуля «ReSample».

Исходные данные ССВР были осложнены волнением моря, наличием кратных волн и волн-спутников, подавление которых в типовом графе не осуществлялось. Современные процедуры обработки данных ССВР позволяют учитывать эти особенности волнового поля, что приводит к повышению разрешающей способности, улучшению возможностей сеймостратиграфического анализа и более однозначному выделению геологических объектов.

4 МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ ГРАФ ОБРАБОТКИ

4.1 Тестирование процедур на модельных данных

Для тестирования модулей «DeGhosting», «Zero-Offset DeMultiple», «Custom Impulse Trace Transforms», «Predictive Deconvolution» на первом этапе были подготовлены модельные данные с точно известным положением границ и заглублением. Использовалась серия трехслойных моделей, отличающихся мощностью первого слоя – водной толщ. Горизонтальная протяженность каждой модели составляла 1000 м, а вертикальная – 500 м. Первая граница представляла собой плоское горизонтальное дно, а вторая являлась криволинейной кровлей третьего слоя с пологим падением (рис. 13).

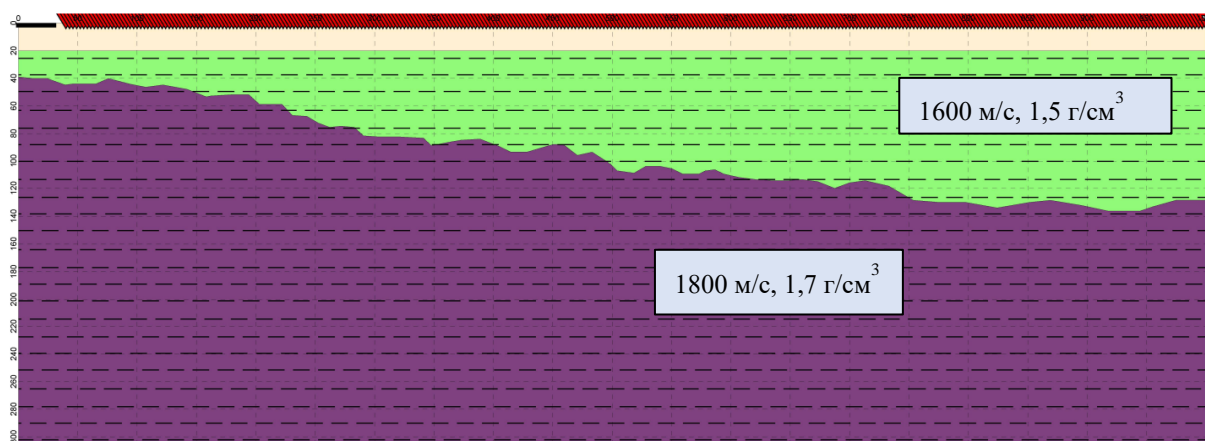


Рисунок 13. Модель с границами раздела

Моделирование осуществлялось с сигналом спаркера, имеющего центральную частоту 220 Гц. Форма сигнала до согласования, заданная в параметрах модели, и итоговая, полученная в результате интерференции, представлены на рисунке 14.

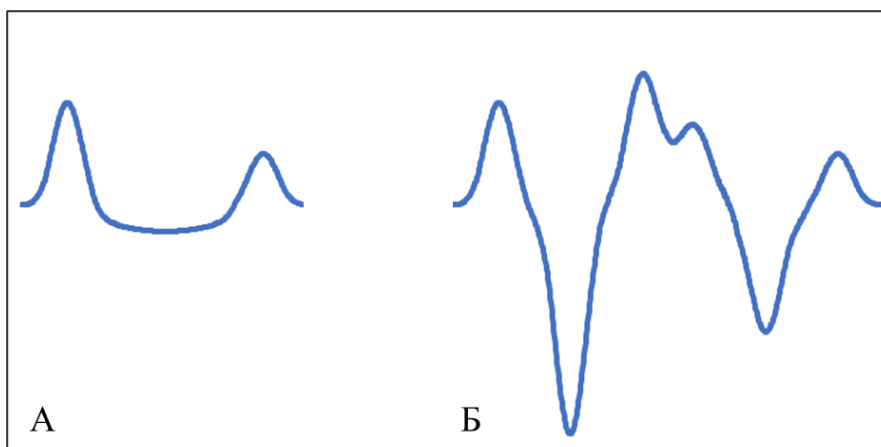


Рисунок 14. Исходная форма сигнала (А) и форма, полученная в результате интерференции (Б)

Система наблюдений соответствовала наиболее часто применяемой в рейсе (1 источник, 16 каналов с интервалом 2 метра, шаг между пунктами возбуждения – 3 метра, минимальное расстояние между источником и приёмником – 10 метров, заглубление источника и приёмника – 1.6 метров).

Суммарный разрез, полученный по модельным данным представлен на рисунке 15. Глубина до первого отражающего горизонта составляла 20 метров. К данным была применена первичная обработка: коррекция амплитуд за сферическое расхождение, суммирование с постоянным скоростным законом, миграция.

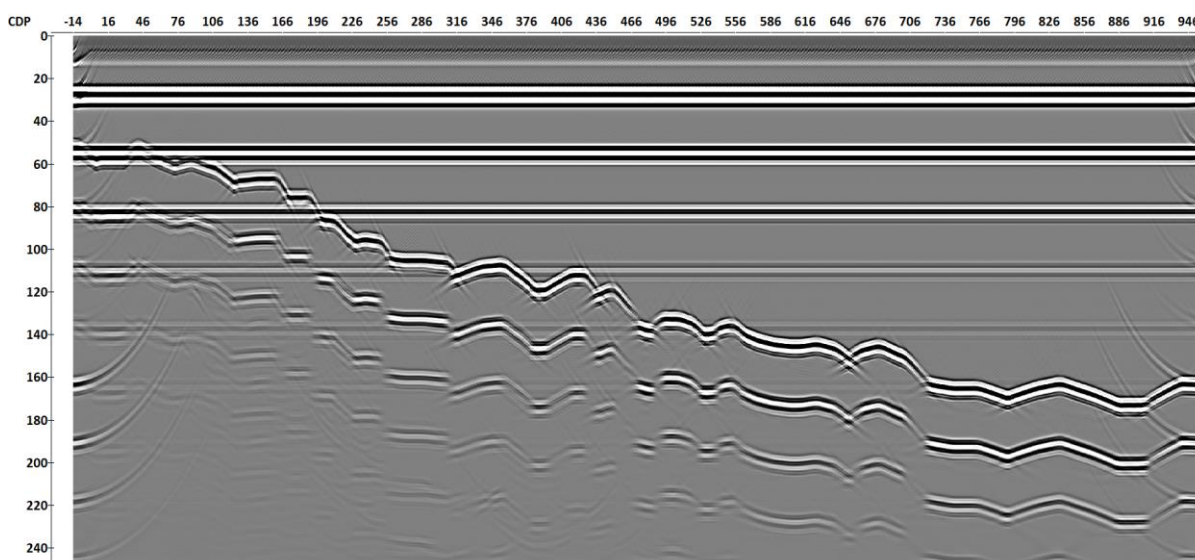


Рисунок 15. Временной разрез, полученный по модельным данным

Для сравнения был получен второй набор модельных данных, в котором отсутствуют волны, связанные со свободной поверхностью. Критерием оптимальности

выбора параметров в процессе дальнейшей обработки будет являться наибольшее сходство с данным разрезом (рис. 16).

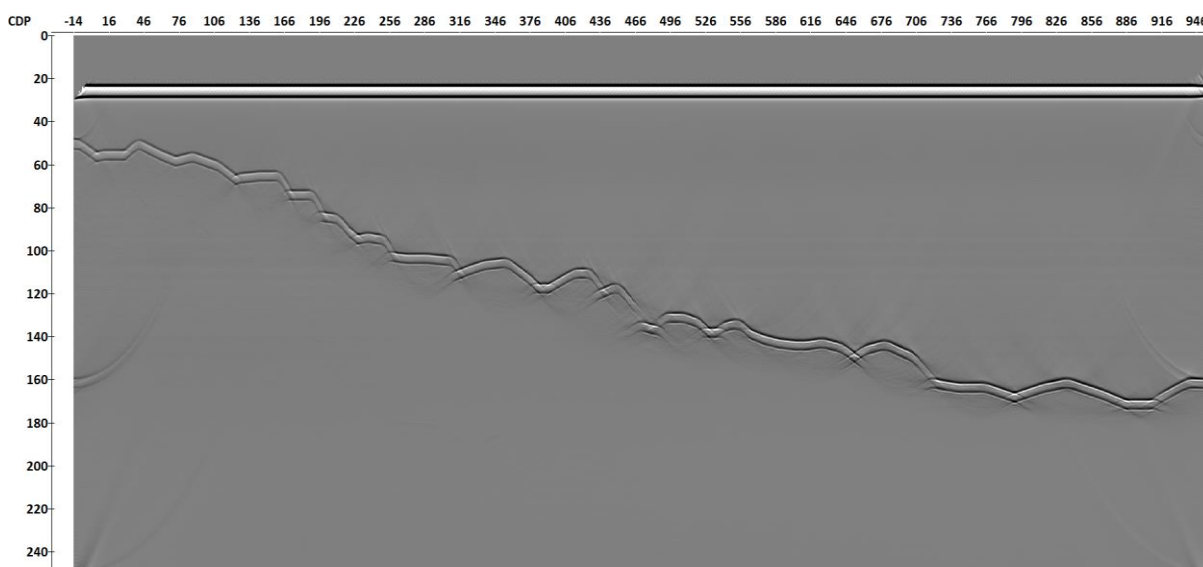


Рисунок 16. Временной разрез, полученный по модельным данным

Подавление кратных волн с длинным периодом повторения осуществлялось в программе «SeisPro» с использованием модуля «Zero-Offset DeMultiple». Некоторые параметры модуля выбирались исходя из знаний о длине импульса. Подбор других параметров осуществлялся в процессе тестирования различных значений.

В модуле осуществлялось изменение следующих параметров:

– Mode – параметр отвечает за способ формирования модели поля кратных волн.

В процессе тестирования была выбрана автосвёртка трасс;

– Filter length – параметр отвечает за длину формирующего фильтра в отсчетах. Как правило длина фильтра должна быть не меньше длины импульса. Увеличение длины фильтра до определенной степени приводит к более сильному вычитанию, а также увеличивает время работы процедуры [5]. В процессе тестирования было выбрано значение равное 500 отсчётам;

– White noise level – параметр регуляризации или уровень белого шума. При увеличении этого параметра результат получается более устойчивым, а эффект вычитания мягче [5]. В процессе тестирования было выбрано значение равное 0.001%;

– Filter calculation step (in traces) – параметр задаёт шаг расчета фильтров. Для промежуточных трасс фильтры будут рассчитываться путем интерполяции. Это приводит к существенному ускорению работы модуля [5]. В процессе тестирования было выбрано значение равное 10 трассам.

Другие параметры остались без изменений.

Результат работы модуля представлен на рисунке 17.

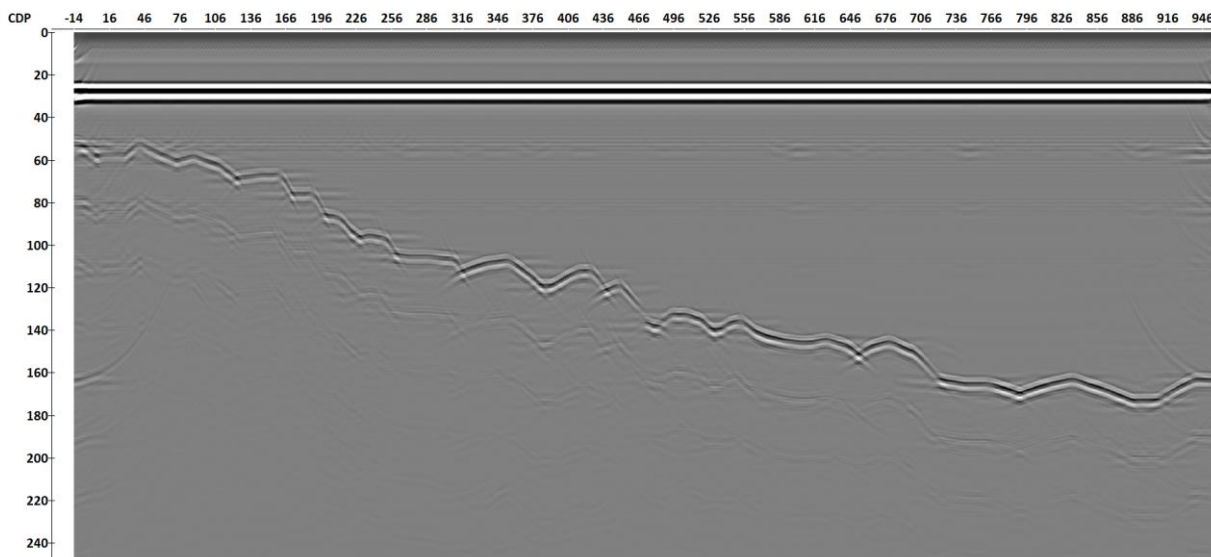


Рисунок 17. Временной разрез после применения модуля «Zero-Offset DeMultiple»

Следующим шагом являлось тестирование модулей «DeGhosting», «Custom Impulse Trace Transforms», для подавления волн-спутников на модельных данных.

Результат применения модуля «DeGhosting» представлен на рисунке 18. Алгоритм, реализованный в модуле, основан на адаптивном вычитании модели волны-спутника из исходного волнового поля. Модель кратных волн формируется из самих данных статическим сдвигом исходных трасс на заданное время. На модельных данных задержка волны-спутника рассчитывалась по формуле:

$$\tau = 2d \cos \theta / V \quad (2)$$

где d – величина заглубления, θ – угол падения, V – скорость в воде.

В модуле осуществлялось изменение следующих параметров:

- Operator length – задает длину формирующего фильтра в миллисекундах. Как правило длина фильтра должна быть не меньше длины импульса. Увеличение длины фильтра до определенной степени приводит к более сильному вычитанию, а также увеличивает время работы процедуры [5]. В процессе тестирования было выбрано значение равное 15 мс;

- White noise level – параметр регуляризации, так называемый уровень белого шума. При увеличении этого параметра результат получается более устойчивым, а эффект вычитания мягче [5]. В процессе тестирования было выбрано значение равное 0.01%;

- Consistent delay (ms) – величина постоянного сдвига, который будет введен в данные в мс. Эта величина должна соответствовать усредненной для всех трасс разнице времени прихода отражения и его волны-спутника [5]. В процессе расчёта времени задержки и последующего тестирования было выбрано значение равное 3 мс;

– Number of traces – параметр, задающий число соседних трасс модели волн-спутников с разных сторон от текущей трассы, которые будут учитываться при построении фильтра. Увеличение этого параметра усиливает эффект вычитания, при этом увеличивается время работы процедуры [5]. В процессе тестирования было выбрано значение равное 3 трассам;

– Filter averaging base (traces) – задает количество трасс, по которым будут осредняться рассчитанные фильтры. При уменьшении параметра вычитание будет становиться более мягким, при увеличении – более жестким [5]. В процессе тестирования было выбрано значение равное 20 трассам;

– Filter calculation step (traces) – параметр позволяет проводить расчёт фильтров не для каждой трассы, а с некоторым. Для промежуточных трасс фильтры будут рассчитываться путем интерполяции [5]. В процессе тестирования было выбрано значение равное 1 трассе.

Другие параметры остались без изменений.

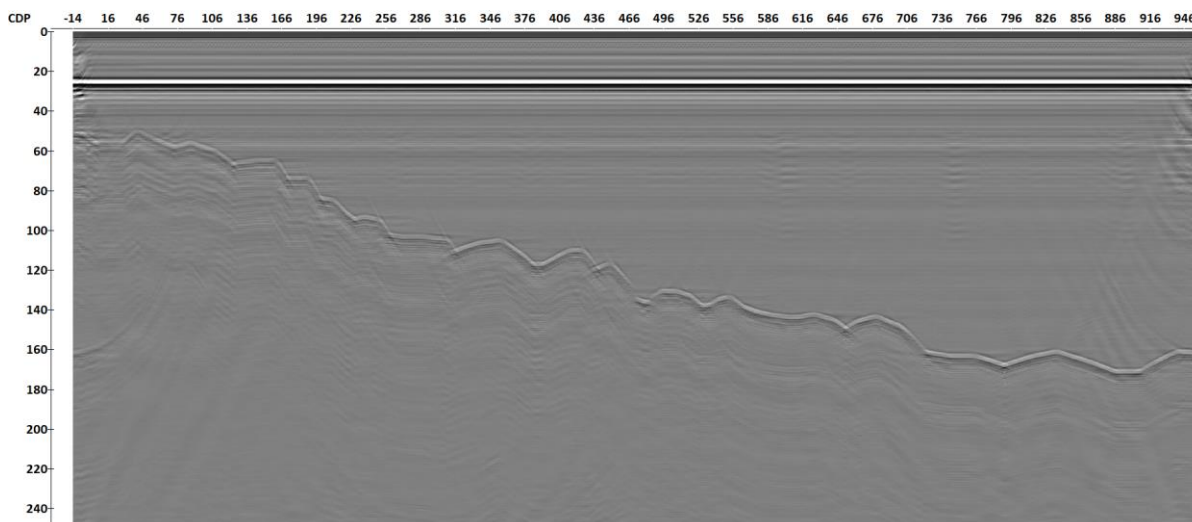


Рисунок 18. Результат подавления волн-спутников на модельных данных с помощью модуля «DeGhosting»

Дальше осуществлялось тестирование модуля «Custom Impulse Trace Transforms» для выполнения детерминистической деконволюции. В качестве формы сигнала было выбрано отражение от дна с ограниченным по времени импульсом. После чего в настройках модуля для амплитудного спектра была выбрана операция деления, а для фазового – вычитание. Результат работы модуля представлен на рисунке 19.

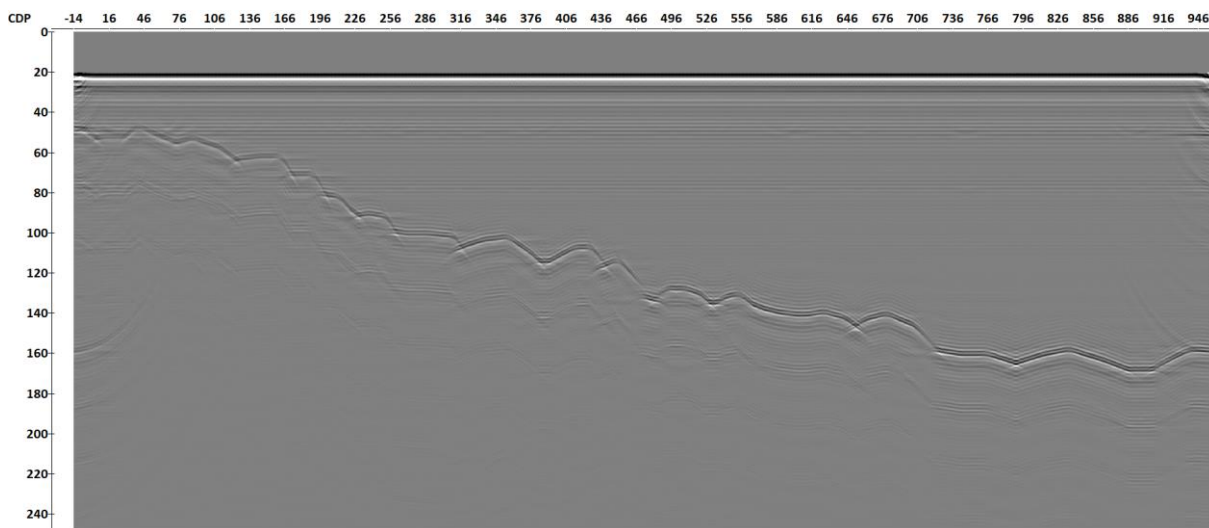


Рисунок 19. Результат подавления волн-спутников на модельных данных с помощью детерминистической деконволюции

Сравнивая разрез свободный от кратных волн изначально и разрезы после обработки можно сделать следующие выводы:

- продолжительность сигнала уменьшилась;
- после применения модуля «DeGhosting» сигнал принял форму, сходную с формой сигнала спаркера;
- запись осложнилась осцилляциями;
- сохранились рудиментарные остатки кратных волн.

4.2 Тестирование процедур на реальных данных

На втором этапе тестирование осуществлялось на части данных, полученных в рейсе, для более тонкой настройки. Для демонстрации результата работы модуля «Zero-Offset DeMultiple» был выбран профиль, полученный в условиях мелкого моря и осложненный интенсивным полем кратных волн (рис. 20).

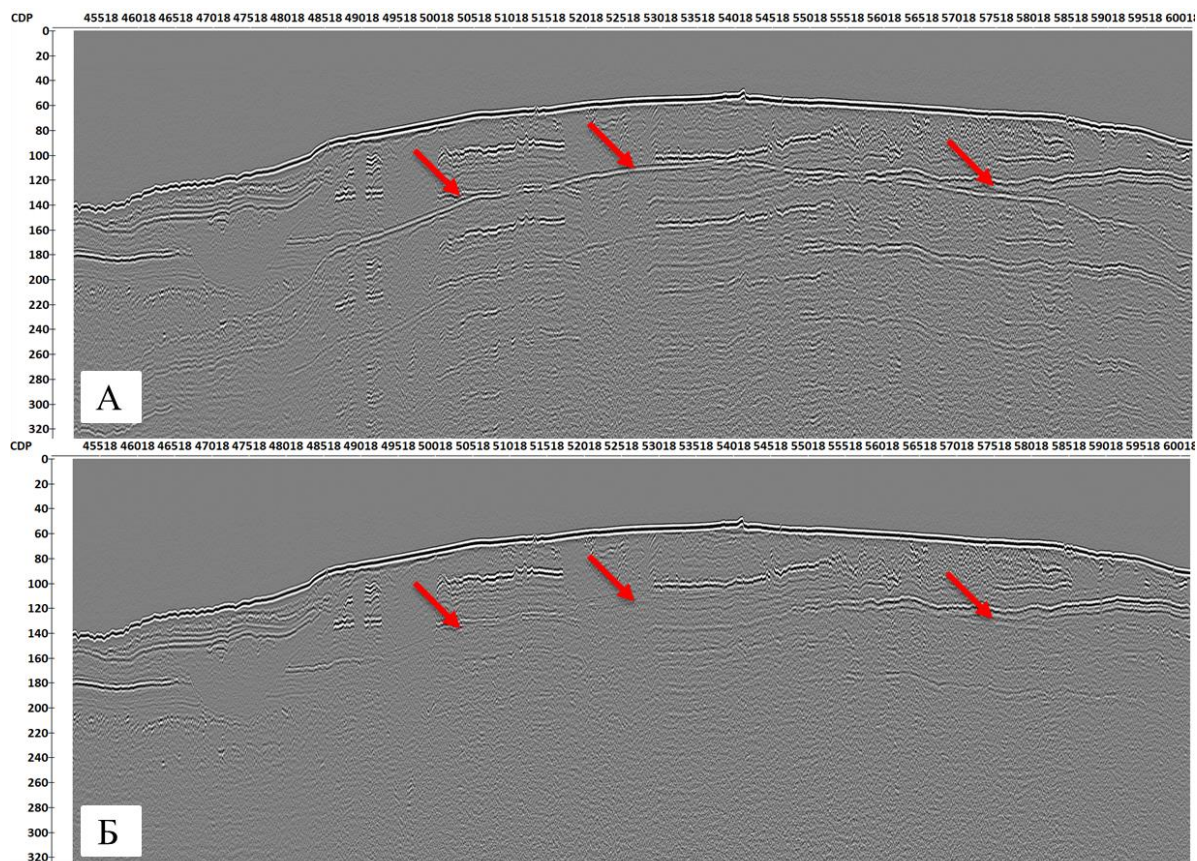


Рисунок 20. Временной разрез после применения модуля «Zero-Offset DeMultiple»
 А – исходный разрез, Б – разрез после применения процедуры, кратная волна первого порядка от дна указана красными стрелками

Модуль сработал довольно эффективно, удалось подавить кратные волны первого и более высоких порядков, в том числе частично-кратные волны.

Далее было проведено тестирование модуля «DeGhosting» на реальных данных. В качестве стартовых параметров модуля использовались значения, полученные при тестировании на модельных данных. При тонкой настройке параметров анализировался амплитудно-частотный спектр сигнала. Задачей являлось получение спектра с наименее выраженными режекциями. На рисунке 21 и рисунке 22 показаны временные разрезы после применения модулей «Zero-Offset DeMultiple» и «DeGhosting», а также их амплитудно-частотные спектры.

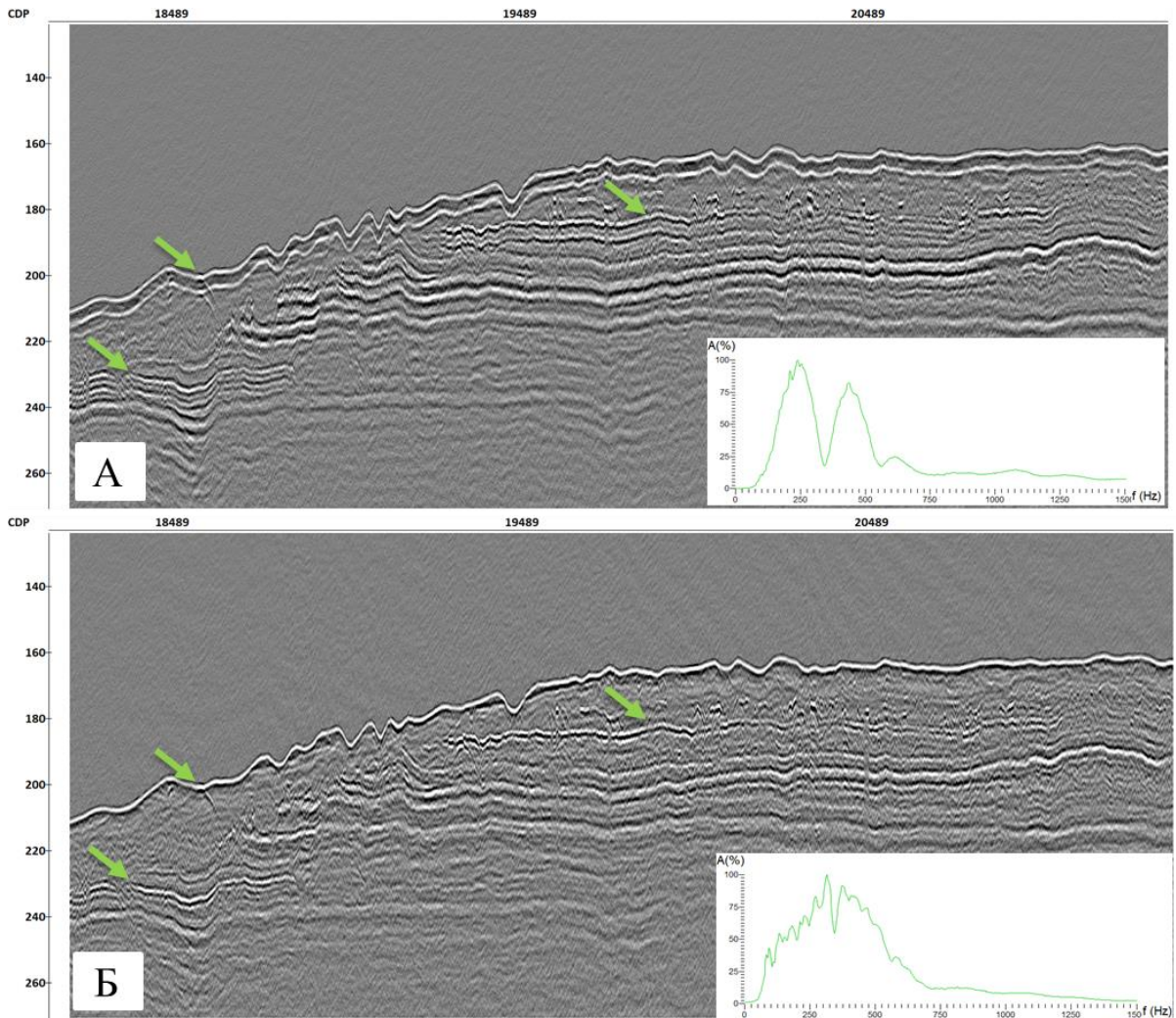


Рисунок 21. Фрагмент временного разреза после применения модуля «Zero-Offset DeMultiple» и «DeGhosting»

А – исходный разрез, Б – разрез после применения процедур

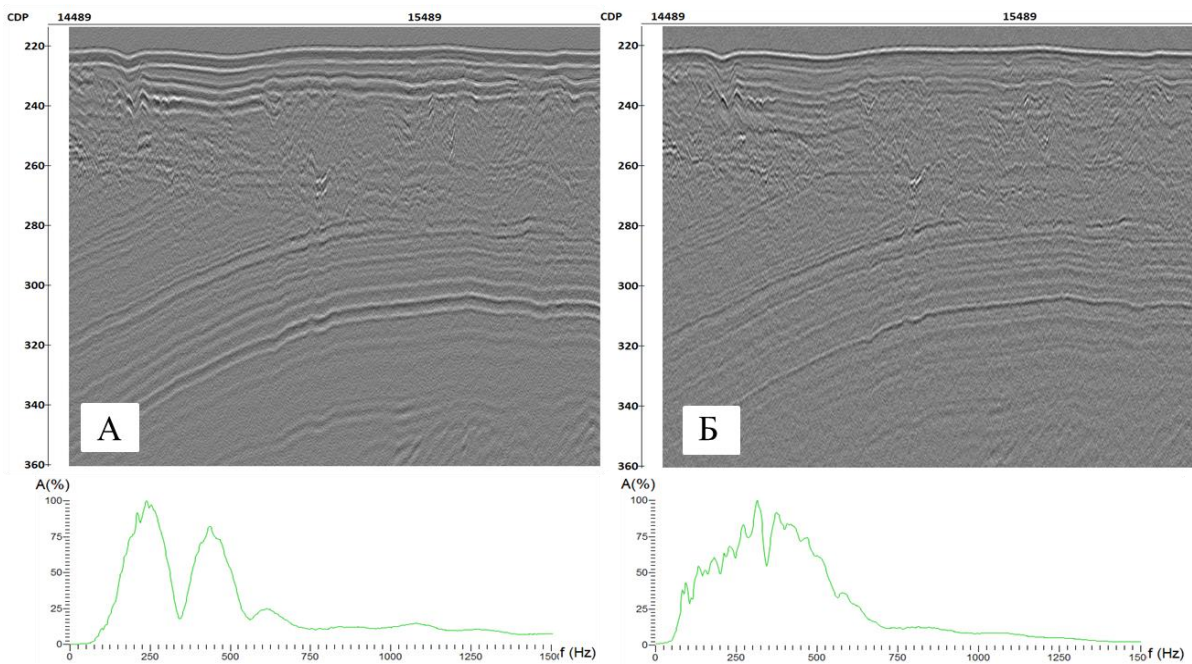


Рисунок 22. Фрагмент временного разреза после применения модуля «Zero-Offset DeMultiple» и «DeGhosting» с отражениями на больших временах
 А – исходный разрез, Б – разрез после применения процедур

Тестирование модуля «Custom Impulse Trace Transforms» для выполнения детерминистической деконволюции осуществлялось на том же участке профиля после выполнения процедуры подавление кратных волн на ближних выносах.

Определение сигнатуры осуществлялось следующим образом:

- 1 Выбиралась часть профиля с относительно плоским дном и стабильной формой сигнала;
- 2 Пикировался отраженный от дна сигнал, который будет использован для деконволюции;
- 3 Импульсы приводились к единому времени, с использованием модуля «Apply Statics» со статическими поправками, полученными на предыдущем этапе;
- 4 Производилось суммирование исправленных трасс с использованием модуля «Ensemble Stack»;
- 5 Полученная трасса сохранялась с использованием модуля «Trace Output»;
- 6 В качестве формы сигнала выбиралось отражение от дна с ограниченным по времени импульсом;

После чего в настройках модуля для амплитудного спектра была выбрана операция деления, а для фазового – вычитание. Результат работы модуля на реальных данных представлен на рисунке 23.

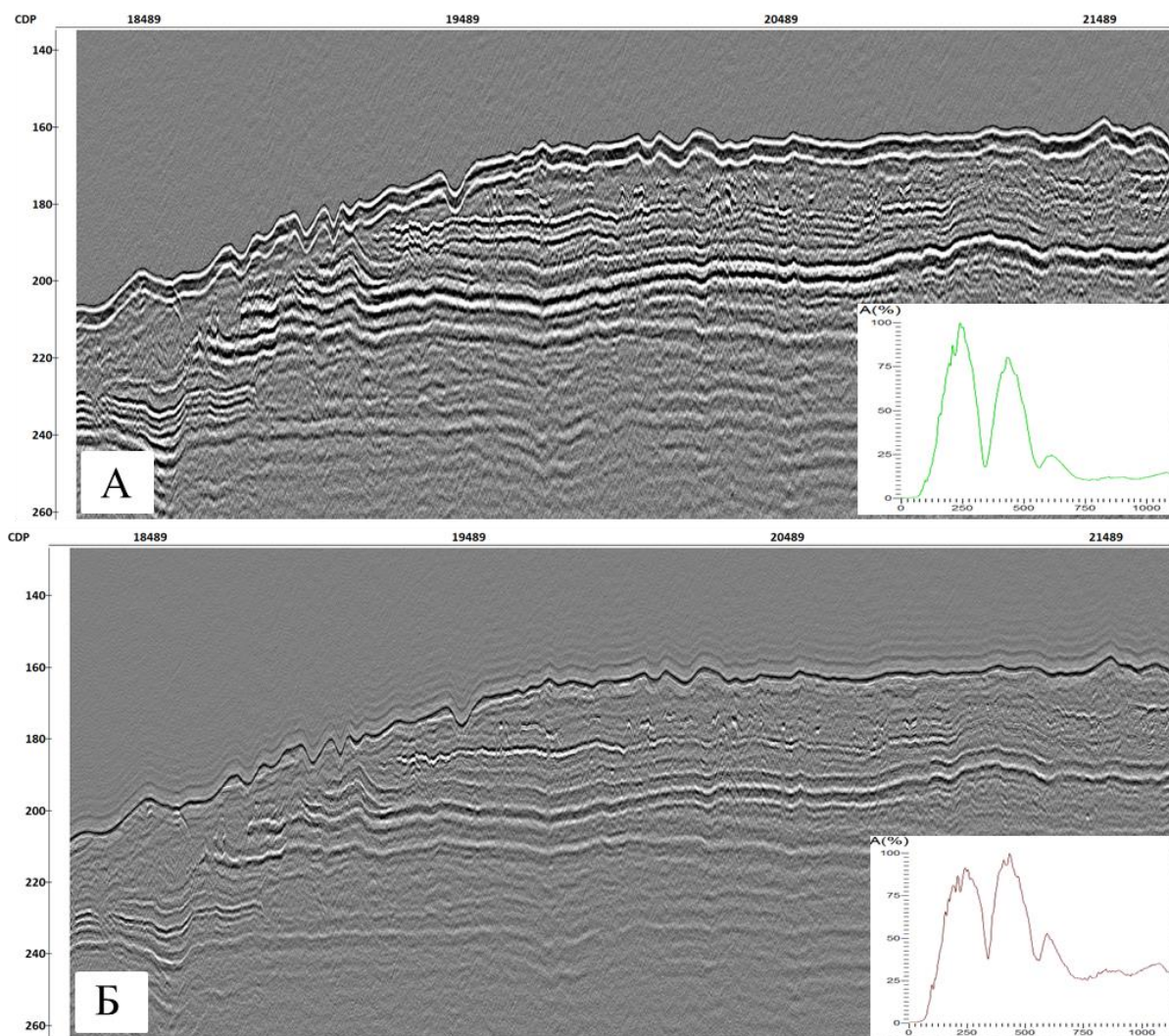


Рисунок 23. Фрагмент временного разреза после применения модуля «Zero-Offset DeMultiple» и «Custom Impulse Trace Transforms»

А – исходный разрез, Б – разрез после применения процедур

Также был применен модуль «Predictive Deconvolution» (рис 24). Данный модуль может использоваться для проведения импульсной деконволюции (spiking deconvolution) с целью увеличения разрешения записи. Длина интервала предсказания задавалась равным шагу дискретизации (0,0625 мс), а длина оператора деконволюции была задана равной длине зондирующего импульса (10 мс).

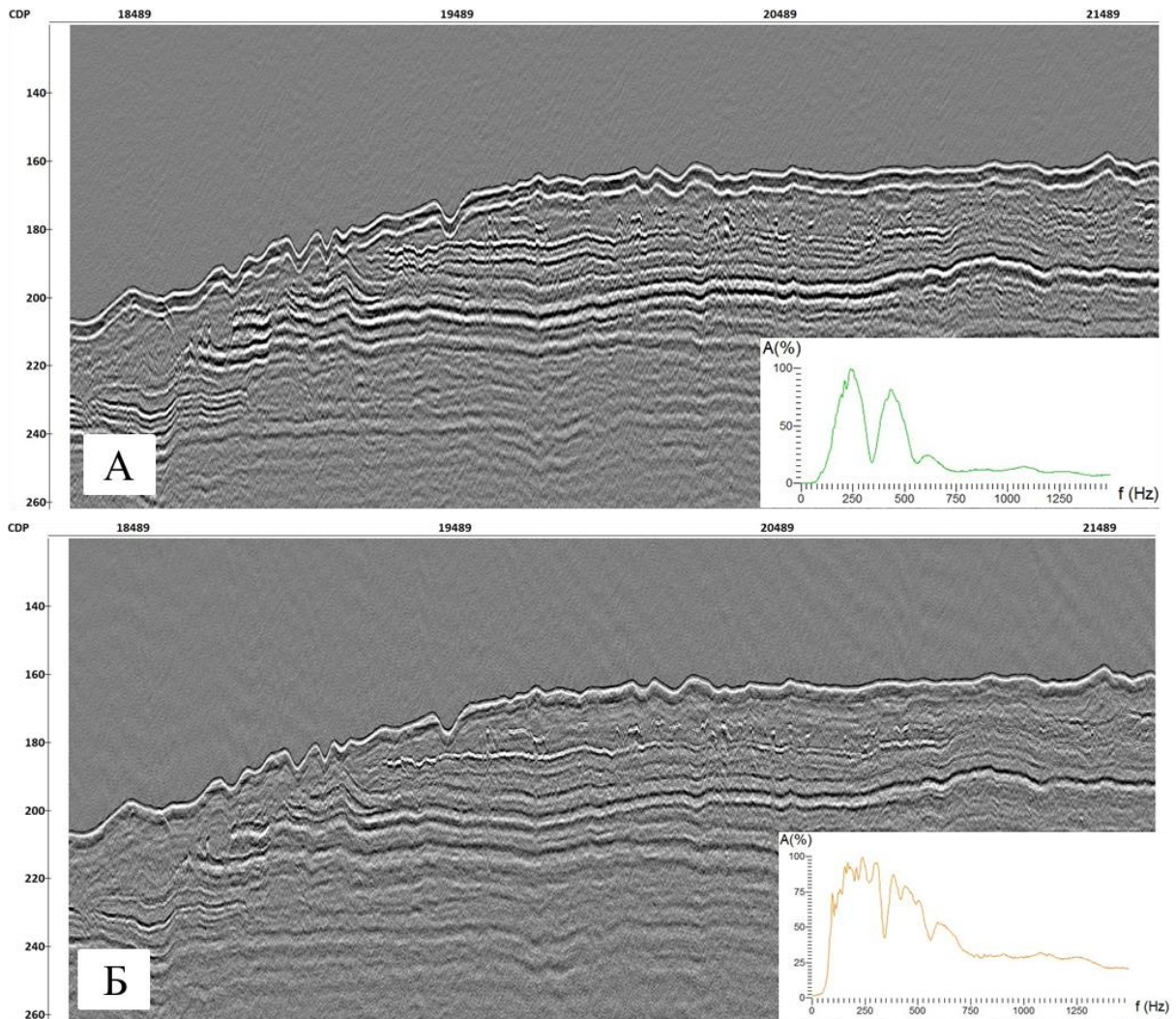


Рисунок 24. Фрагмент временного разреза после применения модуля «Zero-Offset DeMultiple» и «Predictive Deconvolution»

А – исходный разрез, Б – разрез после применения процедур

4.4 Выбор процедур для модернизированного графа обработки

Поскольку большое количество данных в рейсе было получено с короткой косой (30 м) и при относительно больших глубинах моря, для подавления кратных волн с длинным периодом повторения может эффективно применяться модуль «Zero-Offset DeMultiple». При этом модель кратных волн может быть получена за счет автосвёртки сейсмических трасс.

Из трех протестированных модулей для подавления волн-спутников («DeGhosting», «Custom Impulse Trace Transforms», «Predictive Deconvolution») наиболее эффективны оказались первые две процедуры. Данные после предсказывающей

деконволюции, применяемой как импульсная деконволюция, обладали наименьшим отношением амплитуды полезного сигнала к амплитуде помех.

При схожих результатах для построения графа оперативной обработки в качестве процедуры подавления волн-спутников можно рекомендовать модуль «DeGhosting», поскольку он не требует дополнительных действий по получению формы сигнала.

Таким образом, для борьбы с кратными волнами и волнами-спутниками в типовой граф обработки можно добавить следующие процедуры: «Zero-Offset DeMultiple» и «DeGhosting». Схема модернизированного графа обработки представлена на рисунке 25.

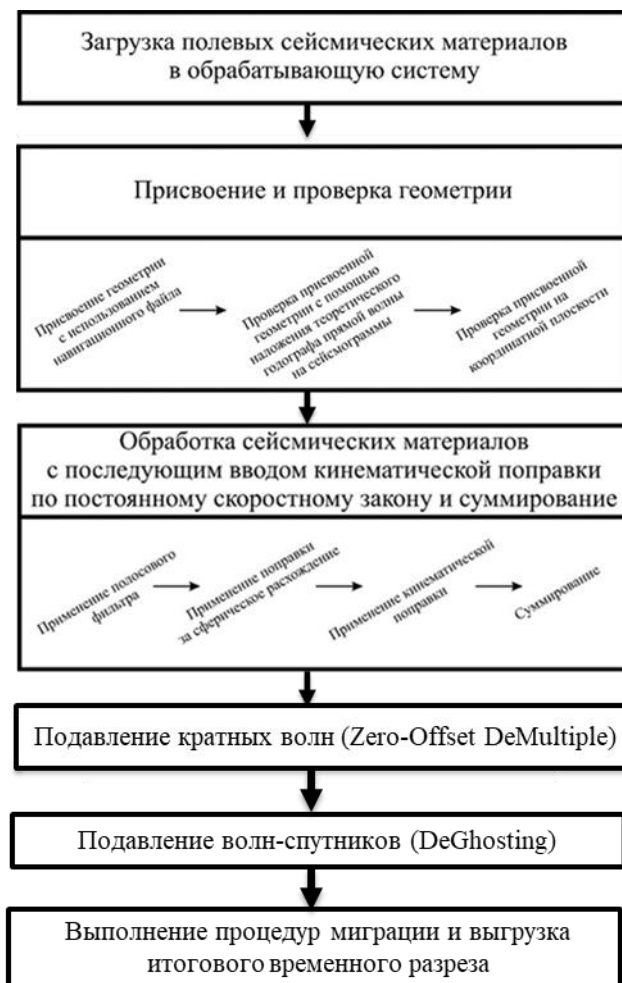


Рисунок 25. Модернизированный граф обработки данных ССВР

5 ТИПОВЫЕ ОПАСНЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ НА ИССЛЕДУЕМОМ УЧАСТКЕ РАБОТ

На исследуемом участке работ большое распространение получили скопления приповерхностного газа. Объекты данного типа ограничены сверху непроницаемыми породами и могут находиться под аномально высоким пластовым давлением, что приводит к риску аварийных ситуаций при бурении скважин.

На рисунке 26 представлен участок профиля с газовой шапкой. Данные для (рис 26 А) были обработаны по типовому графу, а для (рис. 26 Б) по модернизированному.

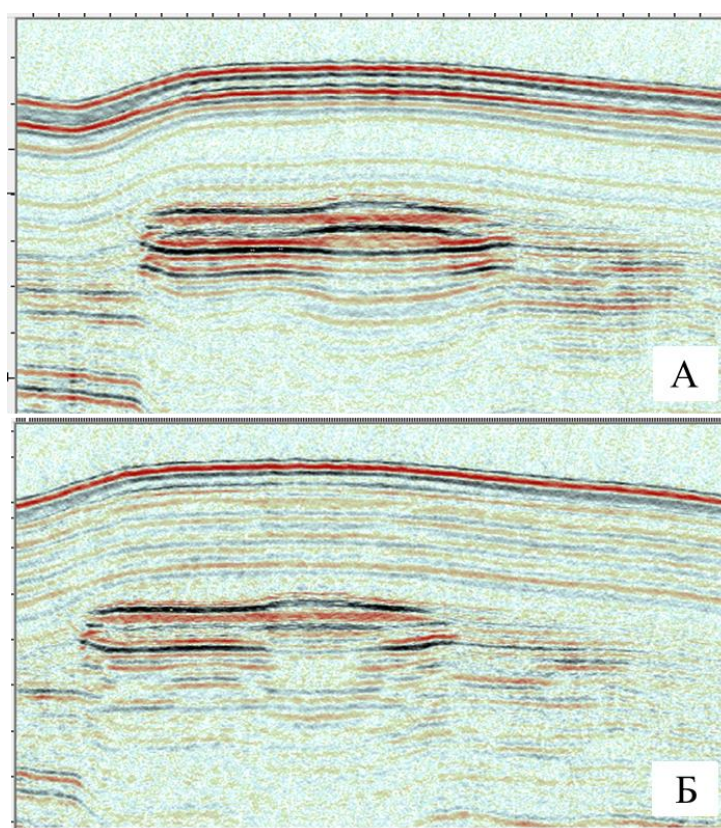


Рисунок 26. Вид газовой шапки на данных, обработанных А – по типовому графу, Б – по модернизированному

Палеоруслы и каналы, включая следы ледникового выпахивания, заполненные более молодыми осадками, являются еще одним типом часто встречающихся объектов, которые также представляют опасность из-за изменчивости прочностных свойств грунтов в пространстве. На рисунке 26 представлено сравнение участка профиля со структурой такого типа, обработанного по типовому графу (рис. 26 А) и по модернизированному (рис. 26 Б).

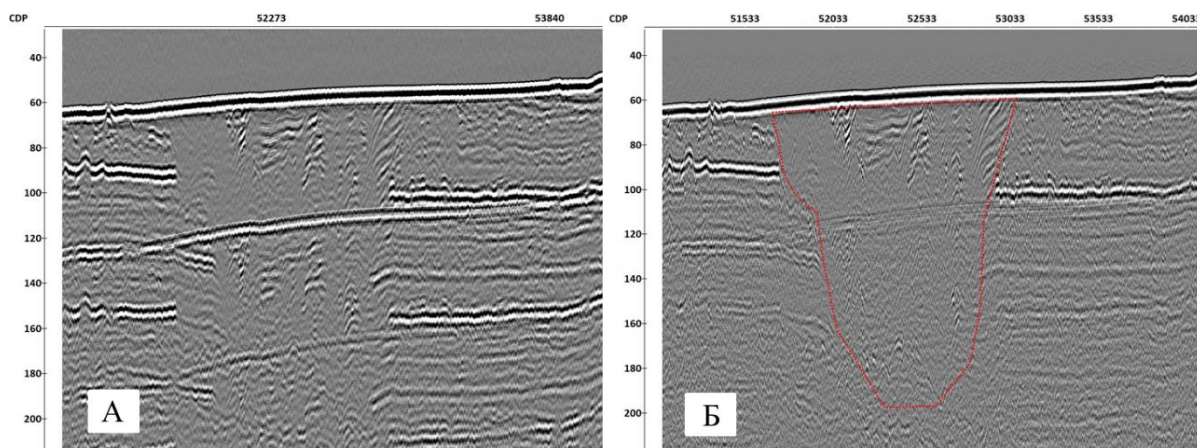


Рисунок 26. Палеоврез (красный пунктир) на данных, обработанных А – без подавления кратных волн, Б – с подавлением

Так же, на исследуемом участке распространены выходы коренных пород, которые требуют детального изучения в связи с резким изменением прочностных свойств грунтов в пространстве и вероятностью возникновения аварийных ситуаций при строительстве инженерных сооружений. На рисунке 27 представлено сравнение участка профиля со структурой такого типа, обработанного по типовому графу (рис. 27 А) и по модернизированному (рис. 27 Б).

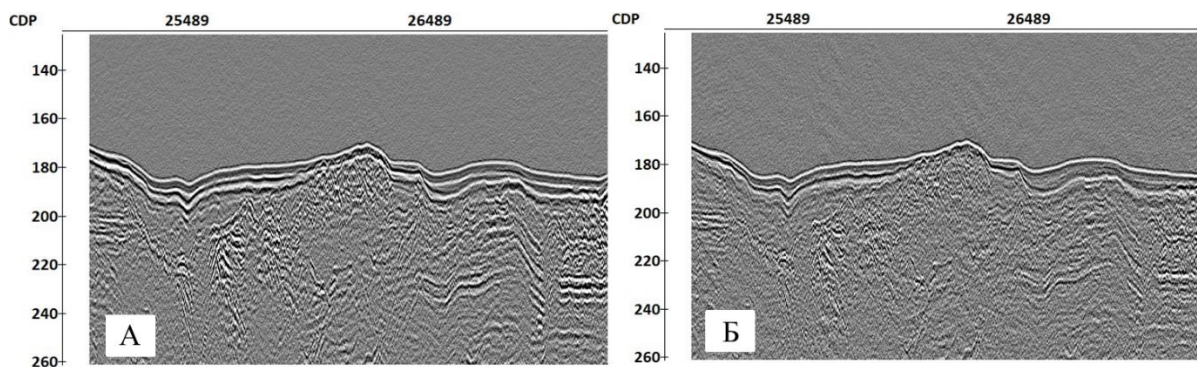


Рисунок 27. Выходы коренных пород на данных, обработанных А – по типовому графу, Б – по модернизированному

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Специфика инженерных сейсмоакустических исследований (приповерхностная буксировка, короткие косы, отсутствие контроля заглубления и др.) накладывает ограничения на диапазон классических процедур обработки, которые можно позаимствовать из нефтяной сейсморазведки. Процедуры подавления кратных волн, основанные на различии в форме годографа однократных и многократных отражений, оказываются малоэффективны при съёмках с короткой системой наблюдения. А приповерхностная буксировка осложняет сигнатуру приёмно-излучающей системы и приводит к снижению разрешающей способности метода. Борьба с кратными волнами при малых удалениях может довольно эффективно осуществляться адаптивным вычитанием модели поля кратных волн, полученной статическим сдвигом или за счёт автосвёртки трасс. Учёт же сигнатуры приёмно-излучающей системы и борьба с волнами-спутниками может осуществляться адаптивным вычитанием модели волны-спутника.

В ходе работы был разработан оптимальный граф обработки для данных, полученных со следующей системой наблюдений: 1 источник (спаркер с доминантной частотой 220 Гц), 16 каналов с интервалом 2 метра, шаг между пунктами возбуждения – 3 метра, минимальное расстояние между источником и приёмником – 10 метров, заглубление источника и приёмника – 1.6 метров.

В качестве процедуры подавлений кратных волн с длинным периодом повторения был выбран модуль «Zero-Offset DeMultiple». Методом задания модели поля кратных волн выбрана автосвёртка трасс, длина формирующего фильтра задавалась равной 500 отсчётам, уровень белого шума равнялся 0,001%, шаг расчета фильтров равнялся 10 трассам.

Для подавления волн-спутников был выбран модуль «DeGhosting». Длина формирующего фильтра равнялась 15 мс, уровень белого шума – 0,01%, величина постоянного сдвига составляла 3 мс, число соседних трасс, учитываемых при построении фильтра, равнялось 3; количество трасс, по которым будут усредняться рассчитанные фильтры – 20, расчет фильтров проводился для каждой трассы.

Обработка всего массива данных, полученных в экспедиции, с использованием модернизированного графа позволила повысить качество данных за счет подавления волн-спутников и борьбы с кратными волнами. На сейсмических записях лучше выделились уже известные объекты, и стали различимы новые особенности волнового поля, что позволит уточнить карту опасных геологических процессов.

Данный граф обработки может быть использован в следующих рейсах с подобной системой наблюдения, что позволит повысить качество оперативной обработки для выбора точек донного пробоотбора.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Боганик Г. Н., Гурвич И. И. Сейсморазведка: учеб. для вузов. – Тверь: Изд-во АИС, 2006. 744 с.
- 2 Бондарев В. И. Сейсморазведка: учеб. для вузов. В 3 кн. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2006. 620 с.
- 3 Вакуленко С. А. Современные методы обработки морской инженерной сейсморазведки // Труды Международной геолого-геофизической конференции «ГеоЕвразия 2018. Современные методы изучения и освоения недр Евразии». – Москва: ООО «ПолиПРЕСС», 2018.– С. 892-897.
- 4 Вакуленко С. А., Буряк С. В., Шувалов А. А., Алехин А. А. Обработка данных высокоразрешающей сейсморазведки – подавление сигнатуры приёмно-излучающей системы // Материалы 17-й научно-практической конференции и выставки «Инженерная и рудная геофизика 2021». – Москва: ООО «ЕАГЕ ГЕОМОДЕЛЬ», 2021. – С. 1-7.
- 5 Руководство пользователя RadExPro 2016.1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://radexpro.com/wpcontent/uploads/2016/09/RU_RadExPro2016.1_manual.pdf.
- 6 СП 504.1325800.2021 Инженерные изыскания для строительства на континентальном шельфе. Общие требования.
- 7 Шалаева Н.В., Старовойтов А.В. Основы сейсмоакустики на мелководных акваториях. Учебное пособие. – М.: изд-во МГУ, 2010. 256 с.
- 8 Dondurur D. Acquisition and processing of marine seismic data. – Elsevier, 2018. 598 p.
- 9 Verschuur D.J. Seismic Multiple Removal Techniques: Past, Present and Future. – Houten, The Netherlands: EAGE Publications, 2006. 174 p.

«21» мая 2023 г.

Пальцев И.О.

