

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

Шिशалова Мария Викторовна
Выпускная квалификационная работа бакалавра
Оценка вклада дифракционного рассеяния на формирование
волновой картины по профилю AR1403 (Арктика)

Уровень образования:

Направление 05.04.01 «Геология»

Профиль «Геофизика»

Научный руководитель:

доцент кафедры геофизики

Института наук о Земле

кандидат геолого-минералогических наук

Половков Вячеслав Владимирович

Рецензент: Смирнов Олег Евгеньевич, ФГБУ
«ВНИИОкеангеология», заведующий сектором
обработки и интерпретации сейсмических
данных отдела морской сейсморазведки, к.г.-м.н.

Санкт-Петербург

2020

АННОТАЦИЯ

Данная работа посвящена изучению дифракционного рассеяния. В работе рассмотрены причины затухания амплитуд сейсмических волн, рассмотрено явление дифракции и проведено математическое и физическое моделирование по оценке вклада дифракционного рассеяния в волновую картину.

Целью работы является оценка вклада дифракционного рассеяния в формирование волновой картины по профилю AR1403 в Восточно-Сибирском море. Количество страниц – 31, рисунков - 27, таблиц - 1.

Ключевые слова: дифракция, рассеяние, амплитуда.

ANNOTATION

The present bachelor thesis is devoted to diffraction scattering. It describes the diffraction phenomenon and causes of seismic wave attenuation. There was carried out physical and mathematical modeling for assessment of diffraction scattering contribution to the wave pattern.

The purpose of this thesis is to assess contribution of diffraction scattering to the wave pattern formation on the line AR1403 in the East Siberian Sea.

Pages – 31, pictures – 27, tables -1

Key words: diffraction, scattering, amplitude.

СОДЕРЖАНИЕ

АННОТАЦИЯ.....	2
СОДЕРЖАНИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ	6
1.1 Дифракция и рассеяние волн	6
1.2. Геология района работ.....	12
2. ОБРАБОТКА ДАННЫХ ПО ПРОФИЛЮ AR1403.....	14
2.1 Информация о геологической съёмке	14
2.2 Подготовка данных, ввод и присвоение геометрии, предварительная обработка.....	15
2.3 Удаление кратных волн.....	17
2.4 Удаление линейных волн-помех и случайного шума, амплитудная коррекция, скоростной анализ, мьютинг и суммирование.....	18
2.5 Построение глубинно-скоростной модели и выполнение миграции до суммирования в глубинной области.....	21
3. МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ.....	22
3.1 Математическое моделирование	22
3.2. Физическое моделирование	27
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	30
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	31

ВВЕДЕНИЕ

Сейсморазведка является одним из ведущих методов геофизики, который используется для определения упругих свойств геологических сред.

Упругим волнам при распространении в реальной среде свойственны такие процессы как рассеяние и поглощение из-за неоднородности геологических сред.

В своей работе я подробно расскажу об этом и продемонстрирую теоретические знания о дифракционном рассеянии на практике.

Цель данной работы: оценить вклад дифракционного рассеяния на формирование волновой картины по профилю AR1403 (шельф Восточно-Сибирского моря).

Задачи работы:

- Изучить литературу по теме исследования
- Освоить программное обеспечение для математического моделирования и обработки сейсмических записей («Tesseral», «RadExPro»)
- Выполнить математическое моделирование волн для упрощённой сейсмогеологической модели среды и проанализировать полученные данные
- Провести физическое моделирование для оценки затухания упругих волн из-за рассеяния на неоднородностях и проанализировать результаты

Анализ сейсмических данных МОВ-ОГТ показывает, что в переходных зонах (рисунок 1) теряется прослеживаемость рефлекторов. Возникает вопрос – это обусловлено геологическим строением или может быть вызвано рассеянием энергии на неоднородностях в верхней части разреза? Может быть это сочетание этих факторов? В рамках работы изначально планировалось ответить на данные вопросы.

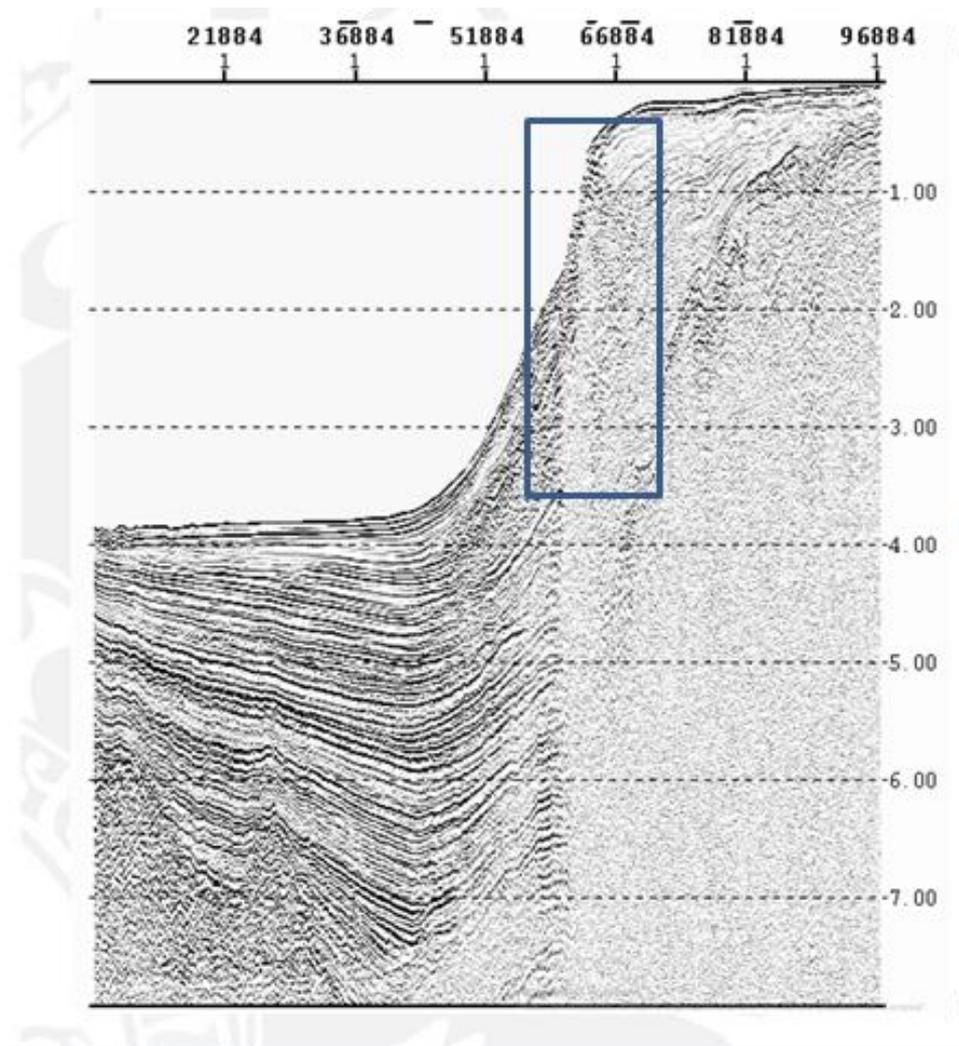


Рисунок 1. Переходная зона профиля AR1403

К сожалению, к окончанию написания данной работы помещения Санкт-Петербургского государственного университета были закрыты и физическая модель, созданная в ресурсном центре прикладной аэродинамики СПбГУ, оказалась недоступна. По этой же причине не было возможности провести эксперимент на кафедре геофизики Института наук о Земле СПбГУ. Поэтому в данный момент в работе показано влияние рассеяния и дифракции на сейсмическую запись в целом, без привязки к конкретному профилю, а также подробно рассказано про обработку материалов по данному профилю и приведены примеры выполненного математического моделирования.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

1.1 Дифракция и рассеяние волн

Реальные геологические среды не являются абсолютно упругими. Причин для этого множество: неоднородный вещественный и фазовый состав компонентов среды, сложное структурное строение, различные нарушения и т.д. При относительно небольших расстояниях пробега сейсмической волны можно пренебречь этим, но при значительном пути пробега волны было обнаружено, что ее амплитуда убывает с расстоянием сильнее, чем это обусловлено геометрическим расхождением фронта волны (интенсивность и плотность энергии сферических волн уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния от источника $E \sim \frac{1}{r^2}$). Под интенсивностью волны понимается количество энергии, протекающей через единичную площадку, нормальную к направлению распространения волны в единицу времени.[5] Фронт волны – поверхность, разделяющая возмущённую и невозмущённую области. [8] В процессе также изменяется форма колебаний, чего не должно происходить в абсолютно упругой среде. Эти особенности указывают на то, что в реальных средах в процессе распространения упругой энергии происходит её частичная потеря за счёт перехода в другие формы, прежде всего в тепловую. [3]

Ослабление амплитуд сейсмических волн в основном объясняется несколькими причинами: поглощение, слоистое рассеяния, дифракционное рассеяние, сферическое расхождение. Между эффектом поглощения и рассеянием есть различие: поглощение характеризуется ослаблением волны из-за необратимой потери сейсмической энергии, а при рассеянии происходит перераспределение энергии.

Поглощающие свойства пород зависят в основном от степени их монолитности, минерального состава, наличия газовой-жидких включений, текстуры горной породы и т.д. Породы с большей скоростью меньше поглощают сейсмические волны, и в породах определённого состава поглощение может варьировать в десятки и сотни раз. [3]

Процесс слоистого рассеяния заключается в том, что при прохождении волны сквозь среду с тонкой и сверхтонкой слоистостью часть её энергии непрерывно расходуется на образование множества очень слабых отражённых волн. Рассеиваются преимущественно высокочастотные составляющие спектра упругих волн.

Дифракция – это явление перемещения энергии упругих колебаний поперёк направления их распространения, обеспечивающее сглаживание резких изменений интенсивности колебаний вдоль фронта волны. [4]

Дифракционное рассеяние – рассеяние упругой энергии на множестве мелких и сверхмелких неоднородностей горных пород, которые встречаются сейсмической волной при ее распространении (рисунок 2). Под неоднородностями в этом случае понимаются разрывные нарушения, ступени, различные включения в горные породы и т.д. Эффект дифракционного рассеяния сильнее сказывается на колебаниях с меньшей длиной волны. [3]

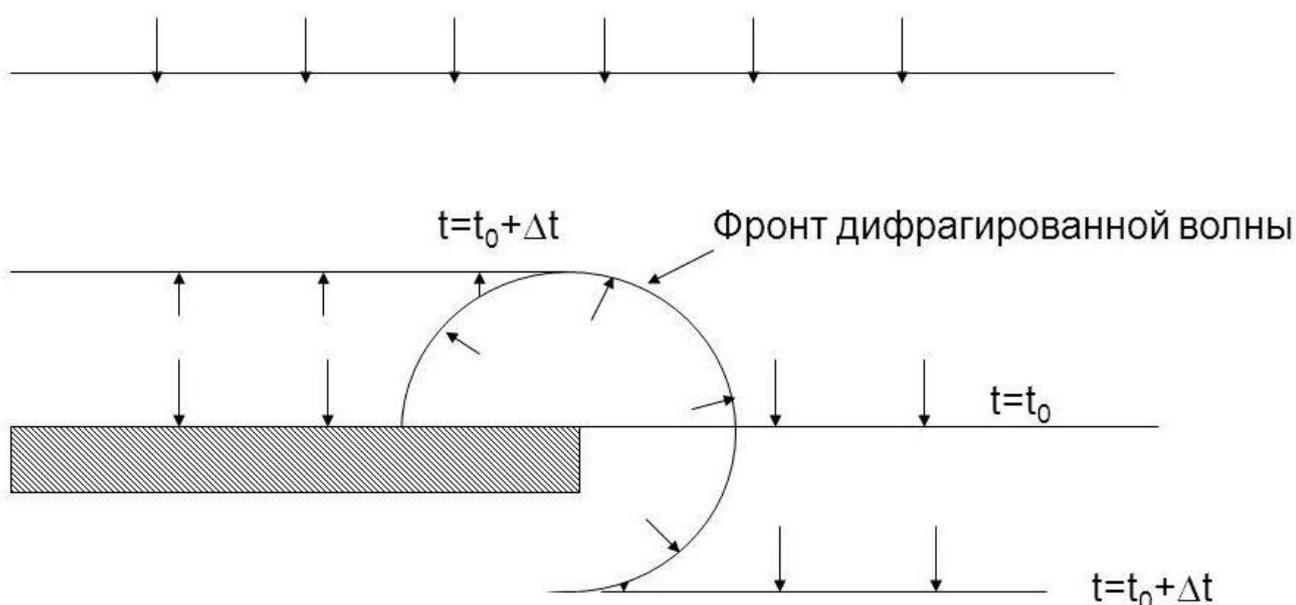


Рисунок 2. Дифрагированные волны

Дифракция является механизмом проникновения сейсмической энергии в области среды, куда по законам геометрической сейсмологии энергия попасть не может. С точки зрения кинематики для описания дифрагированных волн справедлив модифицированный принцип Ферма: путь распространения дифрагированной волны соответствует минимуму суммы времен пробега от источника волн в среде до точки дифракции и от неё – до точки наблюдения. Дифракция возникает при отражении от отражающих объектов размером сопоставимым или меньше диаметра первой зоны Френеля. В этом случае за счёт синфазной интерференции дифрагированных волн с отражённой волной возникает заметное увеличение интенсивности колебаний над эпицентром объекта (рисунок 3). [4]

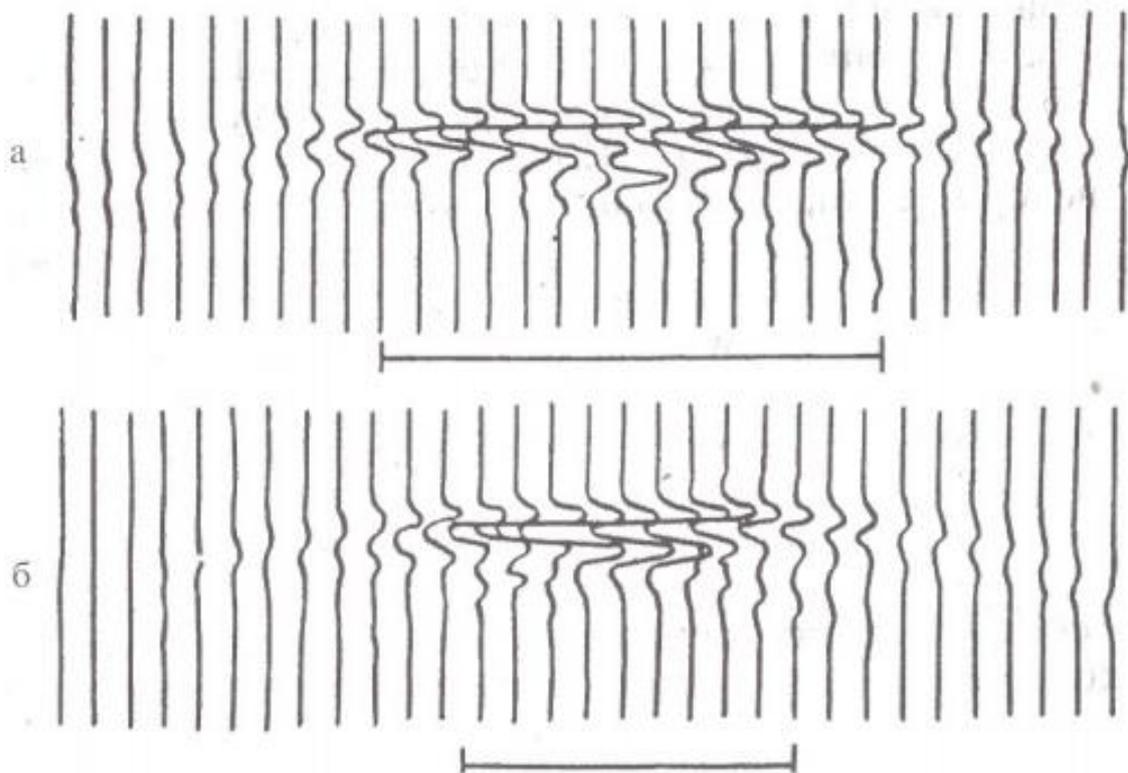


Рисунок 3. Модельные временные разрезы отраженных волн по профилям, проходящим над дифрагирующими элементами в виде дисков, диаметры которых соответственно равны диаметру (а) и половине диаметра (б) первой зоны Френеля [6]

Дифракции может подвергнуться любая волна вне зависимости от ее типа. Наибольшая интенсивность волны находится в точке касания её фронта с фронтом породившей её волны. По мере удаления интенсивность убывает за счёт эффекта геометрического расхождения. Частота дифрагированной волны ниже, чем у волны, породившей её. [8]

Математическая трактовка дифракции сложна, можно воспользоваться упрощённым подходом по Трори. При этом принимается совмещённое положение приемника с источником и постоянная скорость, S-волнами можно пренебречь.

$$\nabla^2 \varphi = \frac{1}{g^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} \leftrightarrow \nabla^2 \Phi = \left(\frac{S}{g}\right) \Phi,$$

Где $\Phi(x, y, z, s)$ – преобразование Лапласа функции $\varphi(x, y, z, t)$, стрелка указывает на эквивалентность в разных областях. По предположению выше $\frac{\partial \varphi}{\partial t}$ и φ равны нулю при $t=0$ для всех значений x, y, z .

Решение этого уравнения для точечного источника в начале координат имеет вид:

$$\Phi = \frac{c}{r} e^{-sr/\vartheta}$$

Где r – расстояние от источника до точки наблюдения, а ϑ – скорость волны.

В общем случае s должно включать преобразование Лапласа от входного сигнала в источнике, но для упрощения преобразование можно взять как единицу, то есть на входе получается единичный импульс – дельта-функция $\delta(t)$. Результаты для источников других типов можно получить, используя свёртку во временной области.

В области, свободной от источников, потенциальная функция Р-волн φ задаётся формулой Кирхгофа с $\Upsilon=0$.

$$4\pi\varphi_P(x, y, z, t_0) = \iiint_V \left(\frac{\Upsilon}{r}\right) dV' + \iint_{\mathcal{S}} \left\{ \left(\frac{1}{Vr}\right) \frac{\partial r}{\partial \eta} \left[\frac{\partial \varphi}{\partial t}\right] - \left[\varphi\right] \frac{\partial(1/r)}{\partial \eta} + \left(\frac{1}{r}\right) \left[\frac{\partial \varphi}{\partial \eta}\right] \right\} d\mathcal{S},$$

Где η – единичный вектор внешней нормали, а квадратными скобками обозначены функции, оцениваемые в точке Q в момент времени $t_Q=t_0-r/\vartheta$. $[\varphi]$ часто называют запаздывающим потенциалом.

С помощью преобразования Лапласа получим следующую формулу:

$$4\pi\Phi = \iint_{\mathcal{S}} e^{-sr/V} \left(\frac{s}{rV} \Phi \frac{\partial r}{\partial \eta} - \Phi \frac{\partial(1/r)}{\partial \eta} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial \eta} \right) d\mathcal{S}.$$

Множитель $e^{-sr/\vartheta}$ возникает по причине того, что φ в подынтегральном выражении в формуле Кирхгофа оценивается в момент $t=t_0-r/\vartheta$, тогда как Φ представляет собой преобразование функции $\varphi(x, y, z, t)$. [5]

Обычно при измерениях нельзя разделить влияние поглощения и рассеяния, для этого используют оценки коэффициента поглощения a , коэффициента добротности Q , декремента поглощения ϑ и константы поглощения B . Эти параметры характеризуют совместное действие всех факторов, вызывающих частотно-зависимое экспоненциальное убывание амплитуды с расстоянием. Ниже указаны соотношения между ними для плоских волн:

$$\vartheta = a\lambda$$

$$a = B\omega^\gamma$$

$$Q = \pi/\vartheta$$

Где λ – длина волны, γ – показатель степени для различных пород от 0 до 2. [1]

Очень слабые и многочисленные рассеянные колебания складываются в растущий фон помех, затрудняющий выделение полезных волн, это называется мутной

средой. Пока что надёжные оценки степени мутности реальных геологических сред отсутствуют. [3]

Исследование затухания упругих волн в зависимости от расстояния даёт информацию о неупругости и рассеивающих свойствах земной среды. Для изучения затухания применяют два подхода [6]:

- 1) Прямой. За основу берётся затухание «брутто», изучается уменьшение амплитуд или амплитудных спектров в зависимости от расстояния. Для оценки потерь делаются предположения, касающиеся геометрического расхождения. Его влияние на амплитуды затем исключаются, в остатке наблюдается суммарный эффект рассеяния и поглощения на трассе.
- 2) Спектральный. В этом подходе за основу берётся форма спектров, которая зависит от расстояния. Делаются предположения, касающиеся амплитудных спектров в очаге, изучается изменение форм этих спектров с расстоянием. Если можно предположить, что по всей изучаемой полосе частот волны имеют однотипный характер геометрического расхождения, то вопрос об этом характере можно оставить в стороне. К сожалению, на практике в большинстве случаев это не так. Потери, которые находятся по изменению спектра являются суммарным эффектом рассеяния и поглощения. Преимущество этого подхода: можно изучать только затухание как по трассе, так и вблизи приёмника. Недостаток: необходимо делать гипотезы относительно спектра источника, предполагать малость спектральных аномалий площадки и делать предположение об отсутствии зависимости геометрического расхождения от частоты. Этот подход удобен при использовании данных одиночной станции. [6]

Ниже представлена оценка затухания поперечных волн в среде вблизи ст. «Петропавловск», Камчатка (рисунок 4).

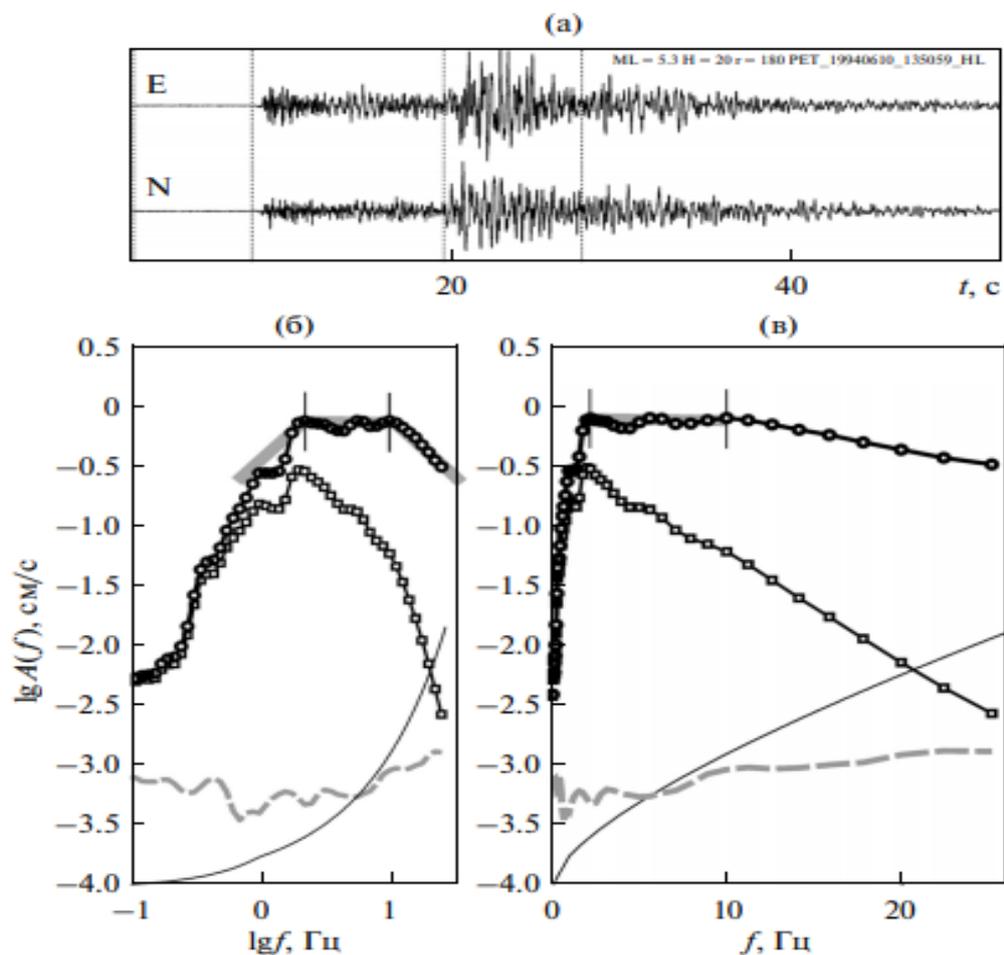


Рисунок 4. Пример обработки записи S-волн, землетрясение 1994.06.10 в 13:26, $ML = 5.3$, $H = 20$ км, $r = 180$ км: (а) – исходные записи горизонтальных компонент ускорения (масштаб по вертикали условный). Две пары штриховые линии отмечают интервал, по которому находили амплитудные спектры шума и Sволн; (б) – спектры $A(f)$ (наблюденный, квадраты), $A_1(f)$ (исправленный за поглощение, кружки), и спектр шума (серая штриховая), приведенные к $r = 1$ км. Тонкая линия внизу – использованный оператор коррекции потерь по модели “2013”, см табл. 1, сдвинутый вниз для упрощения графики. Серая ломаная линия аппроксимирует площадку в исправленном спектре и ее окрестность. Используемая для дальнейшей обработки аппроксимация площадки в спектре ускорения помечена вертикальными отрезками, они соответствуют частотам f_{c2} и f_{c3} . Масштаб билогарифмический; (в) – то же, масштаб полулогарифмический. Видно, что в полулогарифмическом масштабе на неисправленном спектре присутствие угловой точки при f_{c3} практически незаметно.

1.2. Геология района работ

Сейсмический профиль МОВ ОГТ AR1403 имеет протяженность 647.7 км и проходит от массива Де-Лонга через южную часть котловины Подводников до западного склона поднятия Менделеева (рисунок 5). Рядом с бровкой шельфа на профиле наблюдается максимальная для прогиба Вилькицкого мощность осадков – 11 км. Также на профиле зафиксированы проявления магматизма. [7]

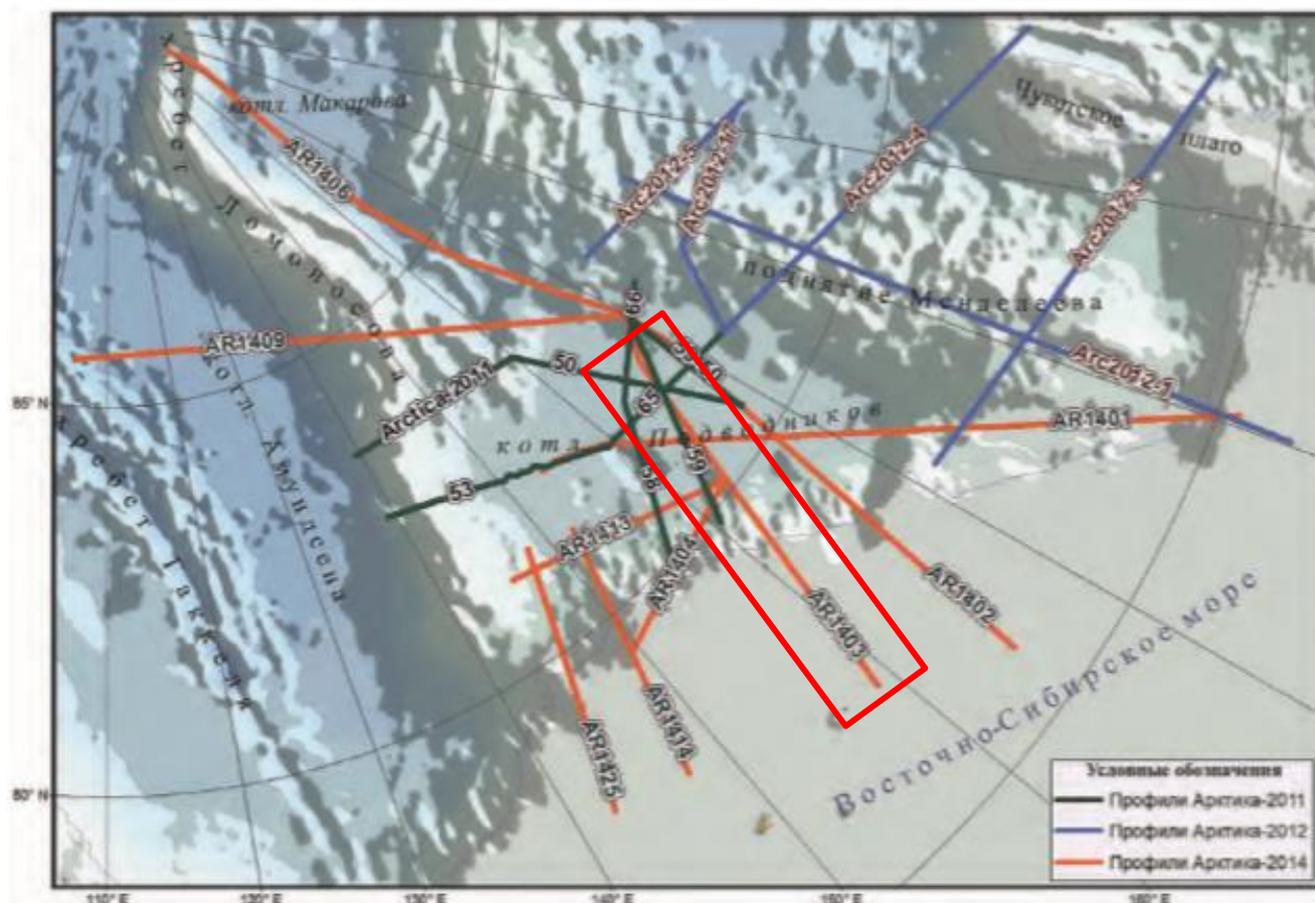


Рисунок 5. Расположение профиля AR1403 [5]

Геологический разрез представлен позднекаледонским складчатым фундаментом, перекрытый пермско-кайнозойским осадочным чехлом. В структуре осадочного чехла выделены следующие сейсмокомплексы [7] (рисунок 6):

- 1) ССК-1 (N1-Q) — пострифтовый комплекс, нижний миоцен — плейстоцен (18,2—0 млн лет). В ненарушенном состоянии и ограничен в основании региональным несогласием RU. Представлен толщей алевритами с песчаными прослоями.

- 2) ССК-2 (E1-E2) — пострифтовый комплекс, верхний палеоцен — средний эоцен представлен морскими мелководными и прибрежными осадками палеогена, ограниченными снизу посткампанским несогласием pCU.
- 3) ССК-3 ($K_{1a} - K_2$) — синрифтовый нижебрукский комплекс ассоциируется с последней стадией магматизма HALIP (80—90 млн лет). Представлен алевролитами и песчаниками.
- 4) ССК-4 (K_{1h-br}) — синрифтовый комплекс формировался в период первой стадии магматизма HALIP (130—120 млн лет). Характерны алевролиты, сланцы, песчаники.
- 5) ССК-5 ($J_3 - K_{1b-v}$) — дорифтовый комплекс, представлен терригенными отложениями (сланцы, песчаники).
- 6) ССК-6 (? $P_3 - J_2$) — дорифтовый верхнеэлсмирский комплекс, представлен терригенными отложениями.

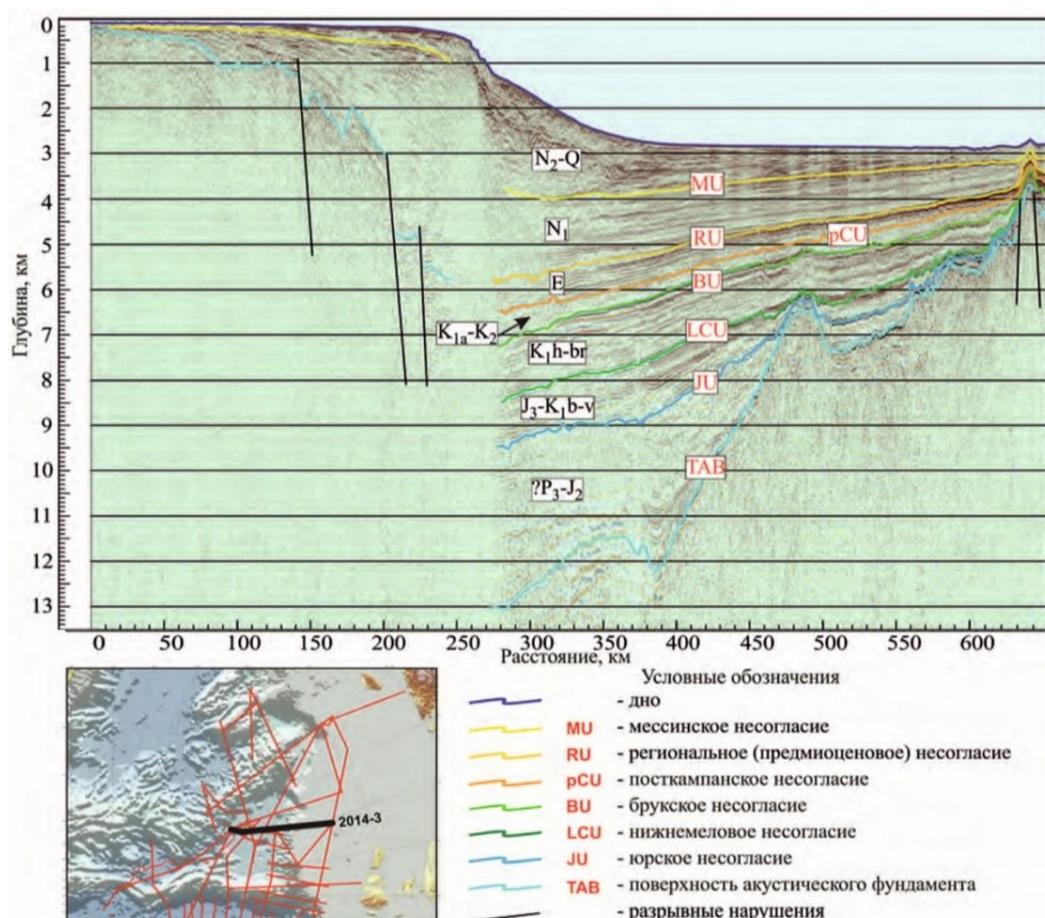


Рисунок 6. Сейсмический разрез МОБ-ОГТ вдоль профиля AR2014-03 [7]

2. ОБРАБОТКА ДАННЫХ ПО ПРОФИЛЮ AR1403

2.1 Информация о геологической съёмке

Сейсмические работы были выполнены с июля по сентябрь 2014 года ОАО «МАГЭ» на НИС «Академик Федоров» под проводкой атомного ледокола «Ямал» в рамках проекта «Оценка перспектив нефтегазоносности российского континентального шельфа за пределами 200 миль в рамках подготавливаемой заявки в Комиссию по границам континентального шельфа, оценка неразведанных потенциальных ресурсов углеводородов в пределах заявки на основе сейсмических исследований МОВ-ОГТ, ГСЗ». [2]

Ниже в таблице приведены основные параметры сейсмической съёмки [2].

Таблица 1

Параметры сейсмической съёмки

Источник	
Модель пневмоисточника (ПИ):	APG BOLT-8500
Количество линий ПИ:	1
Длина рабочей линии:	10,7 м
Количество пушек в линии:	8 пушек (4 пушки объёмом 200 куб. дюймов, 2 пушки объёмом 150 куб. дюймов, 2 пушки объёмом 100 куб. дюймов)
Общий объём ПИ:	1300 куб. дюймов
Средняя глубина буксировки ПИ:	17 м
Номинальное давление:	2000 psi
Шаг возбуждения:	50 метров
Регистрирующая станция:	
Регистрирующая станция:	Sercel Seal v. 5.1

Сейсмическая коса:	Sercel Seal (SSAS) Sentitel (DR)
Длина приёмной части косы:	4500 м
Глубина буксировки косы:	20 м
Количество трасс:	360
Шаг между приёмниками:	12,5 м
Частота дискретизации:	2 Mc

Качество исходных данных высокое. Основные помехи - низкочастотные, связанные с движением судна и косы, прямая волна, а также кратные волны, вызванные реверберацией в водном слое. Обработка данных МОВ ОГТ проводилась в обрабатывающей системе Echos (версия 17), для построения глубинно-скоростной модели и выполнения глубинной миграции использовался пакет Geodepth.

2.2 Подготовка данных, ввод и присвоение геометрии, предварительная обработка

Данные были представлены в SEG-Y формате с заполненными заголовками координат расстановки. После занесения информации о геометрии в базу данных была проведена предварительная обработка материалов: фильтрация низкочастотной помехи от движения судна и косы с помощью порогового фильтра верхних частот (частота пропускания 3Гц), а также расчёт и применение фильтра, подавляющего вторичные пульсации источника. На рисунке 7 приведена временная характеристика корректирующего фильтра. На рисунке 8 дано сравнение сейсмограмм после применения ФНЧ и после фильтрации вторичных пульсаций. Как видно применение фильтра вторичных пульсаций позволило значительно улучшить качество сигнала за счёт удаления низкочастотного шлейфа, т.е. сделав сигнал компактным.

Также на этом этапе вводились амплитудные множители для коррекции амплитуд за сферическое расхождение фронта волны по функции - амплитуда пропорциональна квадрату времени.

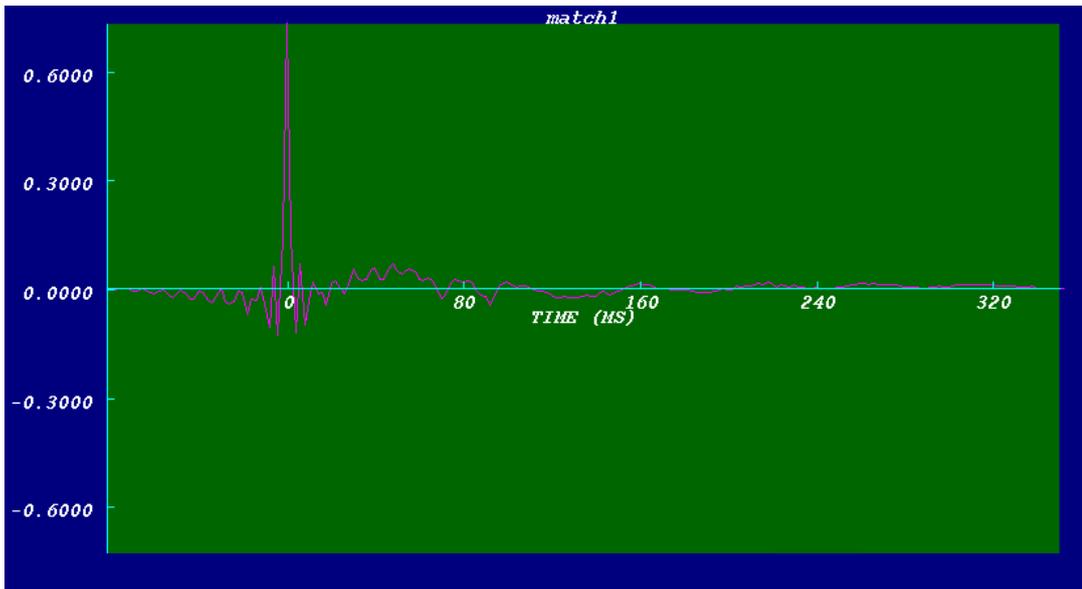


Рисунок 7. Временная характеристика фильтра подавления вторичных пульсаций.

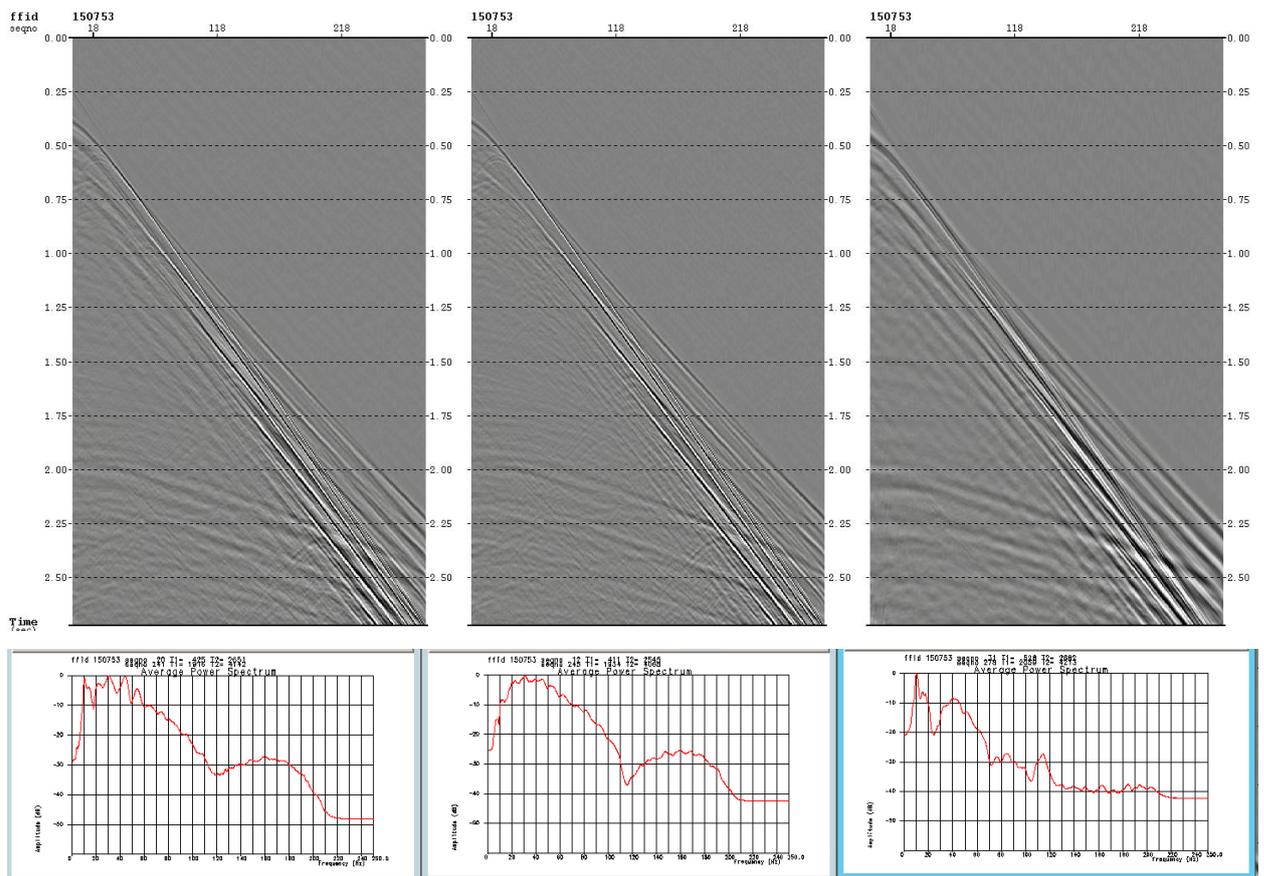


Рисунок 8. Удаление вторичных пульсаций при помощи специальной фильтрации. Слева направо: сейсмограмма после применения 3Гц ФВЧ, в центре – сейсмограмма после применения фильтрации вторичных пульсаций источника, справа – вычтенное поле вторичных пульсаций. Внизу указаны соответствующие суммарные спектры сейсмограмм.

2.3 Удаление кратных волн.

Для удаления кратных волн использовалась процедура WEMA - технология пересчёта волнового поля в точку образования кратной волны с последующим вычитанием полученной модели кратных из исходной сейсмограммы. Для работы данной процедуры необходима точная информация о глубине моря, глубине погружения косы и глубине пункта возбуждения. Для вычитания помехи использовался алгоритм адаптивного вычитания, позволяющего при некоторых погрешностях исходных параметров расчёта добиться оптимального вычитания помехи. При вычитании использовалось окно настройки 11 трасс шириной и 300 мс длиной, сдвиг окна по X – 1 трасса, сдвиг окна по времени - 150 мс.

Результат моделирования и вычитания кратных волн на примере сейсмограммы ОПВ представлен на рисунке 9. Процедура WEMA позволяет достаточно эффективно избавиться от большинства кратных волн, которые генерируются в результате переотражений в водном слое.

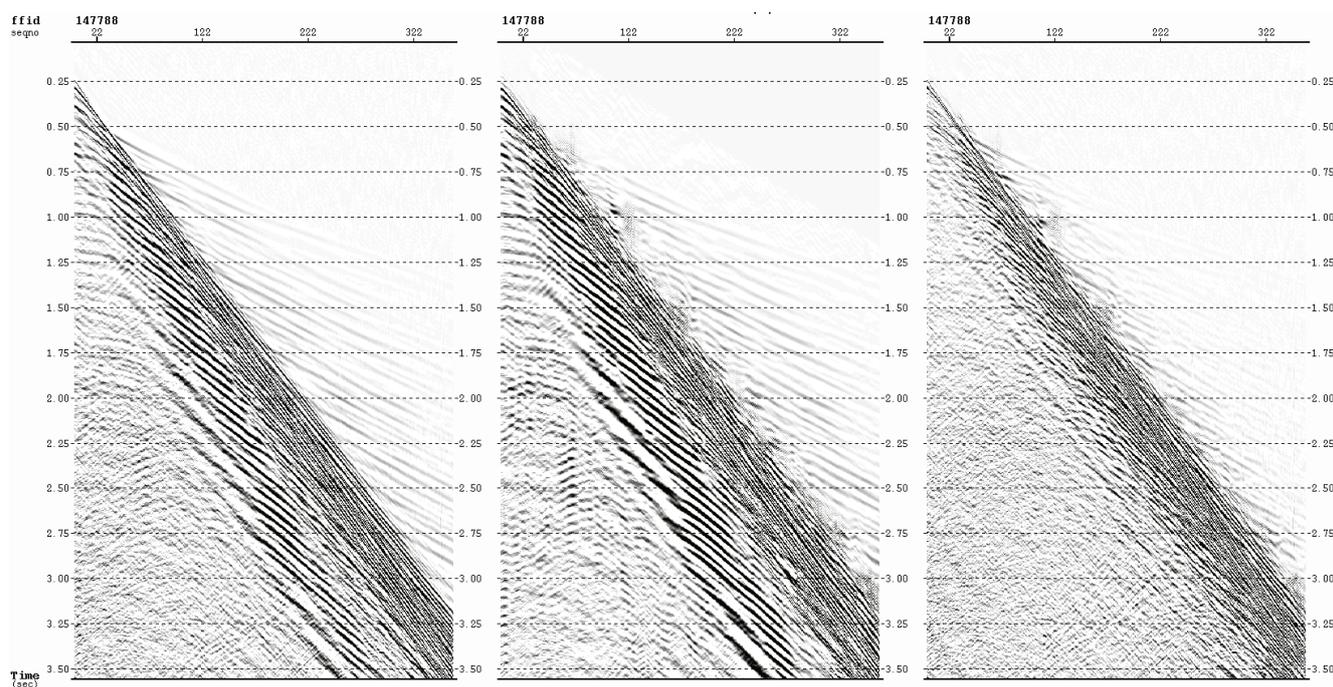


Рисунок 9. Иллюстрация эффективности применения процедуры WEMA при вычитании кратных волн от водного слоя. Слева направо – исходная сейсмограмма после предварительной обработки, в центре смоделированное поле кратных волн, справа - результат вычитания кратных волн.

2.4 Удаление линейных волн-помех и случайного шума, амплитудная коррекция, скоростной анализ, мьютинг и суммирование

После вычитания кратных волн проводилось удаление линейных волн-помех. Для этого использовалась FK фильтрация в скользящем окне. Размер окна расчёта фильтра 41 трасса на 41 мс, диапазон фильтрации наклонов от -6 мс/тр до 6 мс/тр, режим - пропускание. На рисунке 10 представлена сейсмограмма ОПВ до и после выполнения фильтрации наклонов в скользящем окне. Данная процедура позволила эффективно удалить низкоскоростной, низкочастотный, аддитивный шум, не исказив однократные отражения.

Для вычитания остаточного случайного шума использовалась процедура RNA, основанная на преобразовании в области сдвиговых матриц. Параметры процедуры: размер окна 31 трасса на 400мс, порог пропускания 30% от нормы. На рисунке 11 представлена сейсмограмма до и после выполнения RNA.

Коррекция усиления проводилась с помощью поверхностно-согласованного алгоритма регулировки амплитуд. Были рассчитаны корректирующие множители для ПВ, удаления и ОГТ. На рисунке 12 выведен разрез до и после применения поверхностно-согласованной регулировки амплитуд.

Скоростной анализ проводился с шагом 1200 ОГТ. В переходных зонах шаг сгущался до 500 ОГТ. Всего было сделано 3 итерации скоростного анализа. Перед скоростным анализом делалась жёсткая фильтрация наклонов с пропуском в диапазоне от -2 до 2 мс. Однако при построении временных разрезов жёсткая фильтрация наклонов не использовалась.

Мьютинг для построения временных разрезов пикировался с шагом 5000 ОГТ. В переходных зонах шаг мьютинга учащался до 500 ОГТ. На рисунке 13 представлен разрез после выполнения всех процедур обработки на стадии до миграции в сравнении с предварительным разрезом.

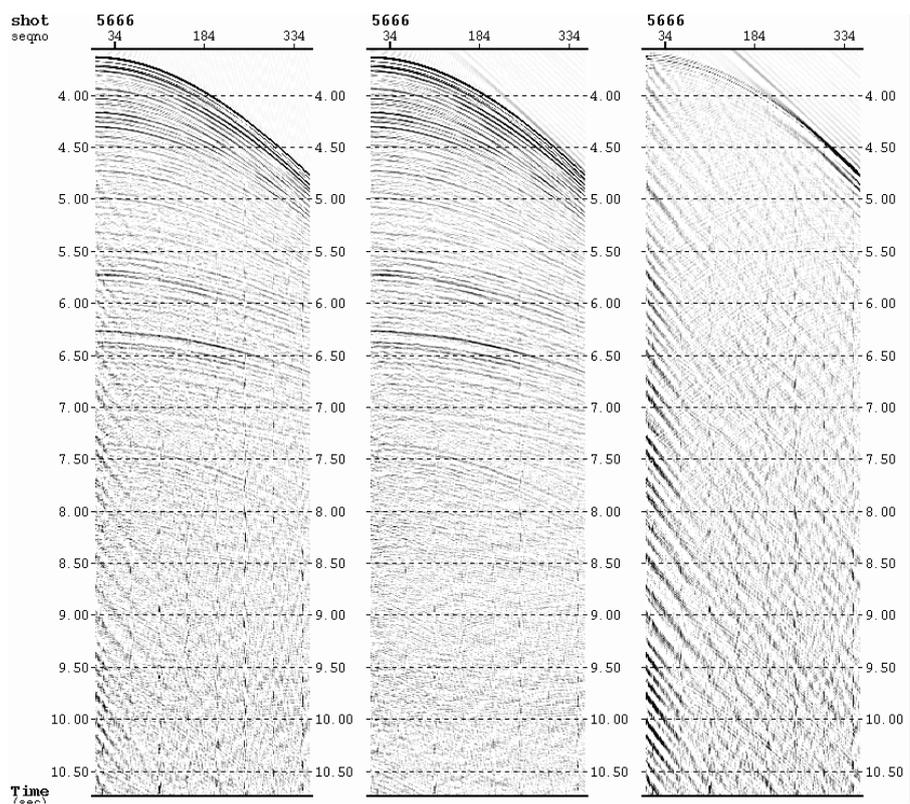


Рисунок 10. Результат действия фильтра наклонов при удалении регулярных низкоскоростных волн помех. Слева направо – исходная сейсмограмма после удаления кратных волн, в центре - результат фильтрации, справа – вычтенное поле помех .

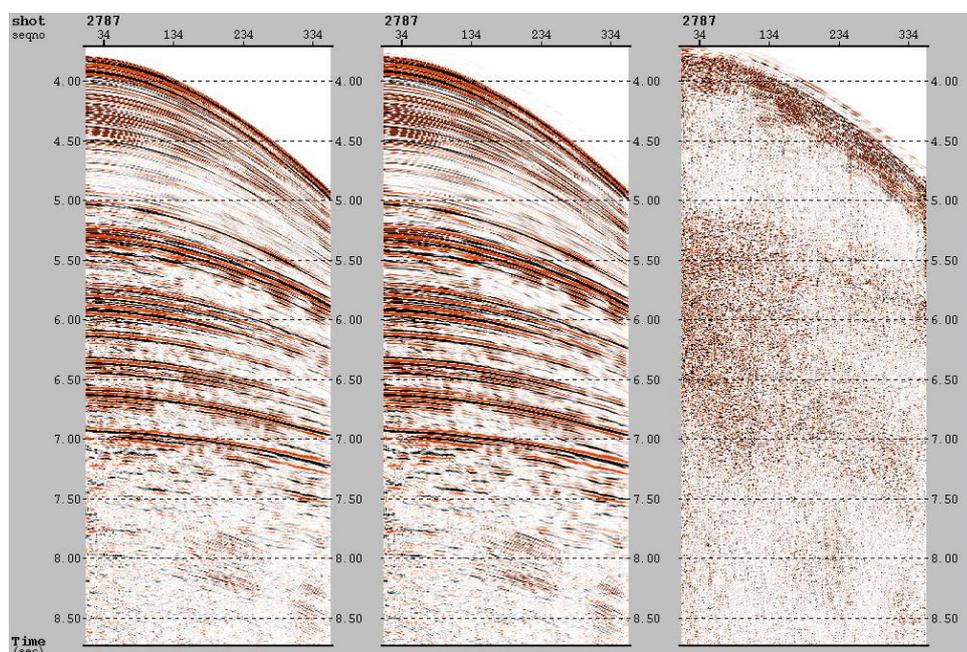


Рисунок 11. Удаление случайного шума при помощи процедуры RNA. Слева направо – исходная сейсмограмма после подавления линейного шума, в центре – сейсмограмма после выполнения RNA фильтрации, справа – вычтенное поле случайного шума.

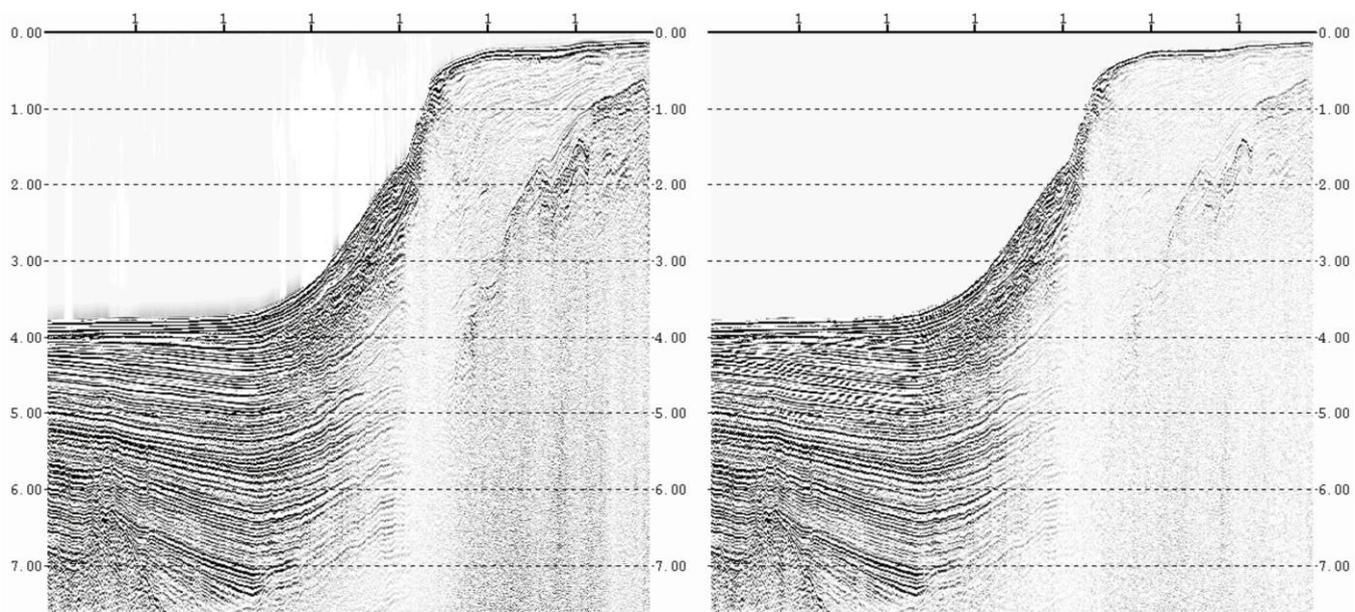


Рисунок 12. Временной разрез до (справа) и после (слева) выполнения поверхностно-согласованной регулировки амплитуд.

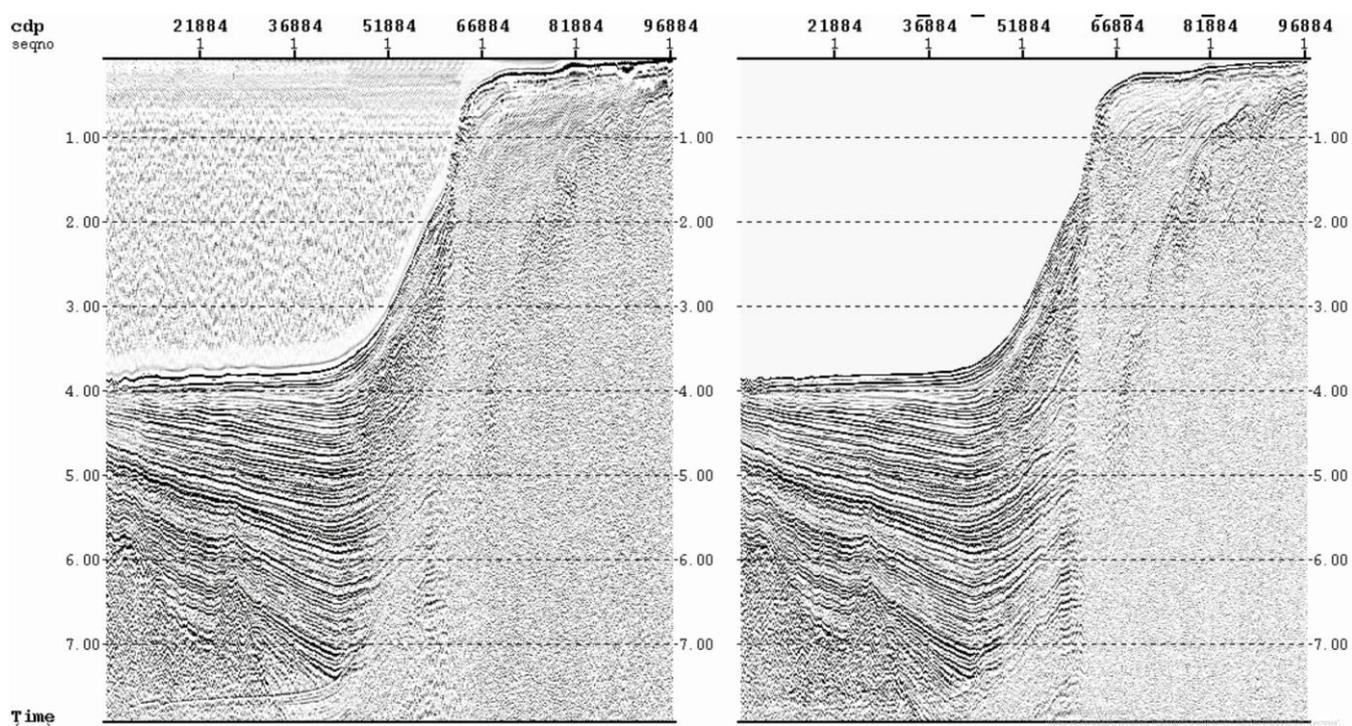


Рисунок 13. Сравнение предварительного разреза (слева) с разрезом после выполнения всех процедур обработки во временной области (справа).

2.5 Построение глубинно-скоростной модели и выполнение миграции до суммирования в глубинной области

При построении глубинно скоростной модели для миграции использовался пересчёт скоростей ОГТ в мгновенные интервальные скорости по формуле Дикса. Миграция до суммирования в глубинной области проводилась со следующими параметрами: апертура 12 км, с постоянным нарастанием от 0 до полной апертуры в диапазоне глубин 0-2000м, антиэляйсинг фильтр – треугольный, мьютинг растяжения не использовался. Коррекция усиления за сферическое расхождение проводилась в процессе миграции с учётом изменения скоростей. Полученный в результате миграции разрез в сравнении с временным разрезом приведены на рисунке 14.

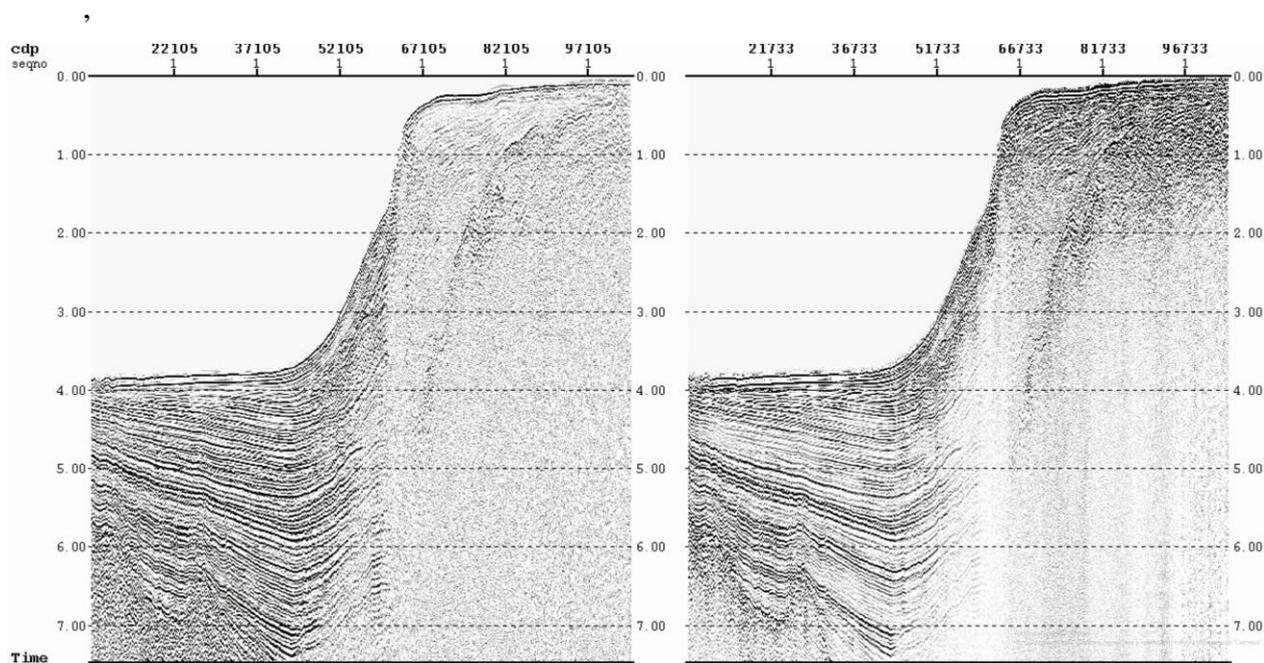


Рисунок 14. Слева - окончательный временной разрез, справа – разрез после глубинной миграции

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ

3.1 Математическое моделирование

Математическое моделирование было проведено с помощью программы Tesserat 7.2.8.

Мой первоначальный эксперимент представляет собой изучение распространения упругих волн в упрощённой геологической среде, состоящей из трех слоёв глубиной 3000м и шириной 15000м (рисунок 15).

1 слой представляет собой слой воды, имеет мощность 500м, в нём скорость распространения сейсмических волн составляет 1500м/с.

2 слой также имеет мощность 500м, в нём скорость распространения сейсмических волн составляет 1900м/с. Кровля этого слоя ровная на отрезках до 6000м и от 9000м до 15000м. На отрезке с 6000м до 9000м рельеф на кровле этого слоя очень расчленённый (рисунок 16).

3 слой прослеживается до глубины 3000м и имеет мощность 2100м, скорость распространения сейсмических волн составляет 2100м/с. Его кровля ровная, без каких-либо поднятий и опусканий.

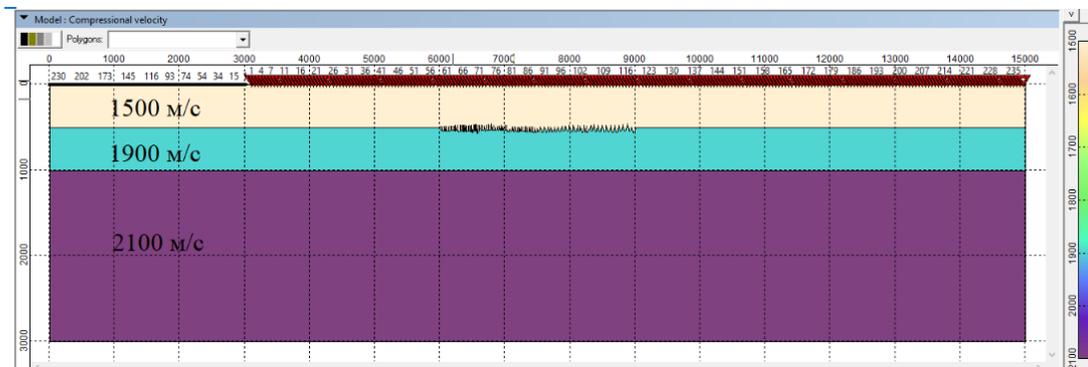


Рисунок 15. Экспериментальная геологическая модель

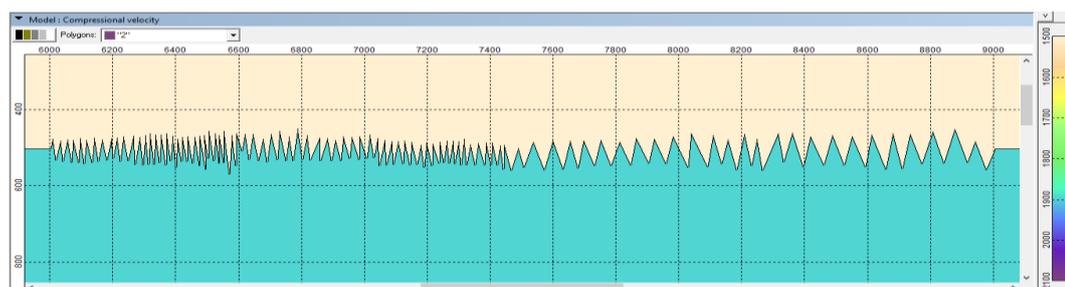


Рисунок 16. Экспериментальная модель с расчленённым рельефом в увеличенном масштабе

Разница по высоте между максимальными и минимальными точками рельефа составляет примерно 80м, а соседние максимальные (минимальные) пики находятся друг от друга на расстоянии примерно от 15м в начале до 60м в конце. Частота пиков уменьшается с расстоянием от точки, где наблюдается первое поднятие. Выбор амплитуды и расстояния между пиками объясняется длиной волны (60м).

Количество источников – 238. Длина приёмной косы – 3000м, приёмники располагаются друг от друга в 12,5м. Количество приёмников - 240. Расстояние между первым источником и приёмником (минимальный offset) – 100м (рисунок 17).

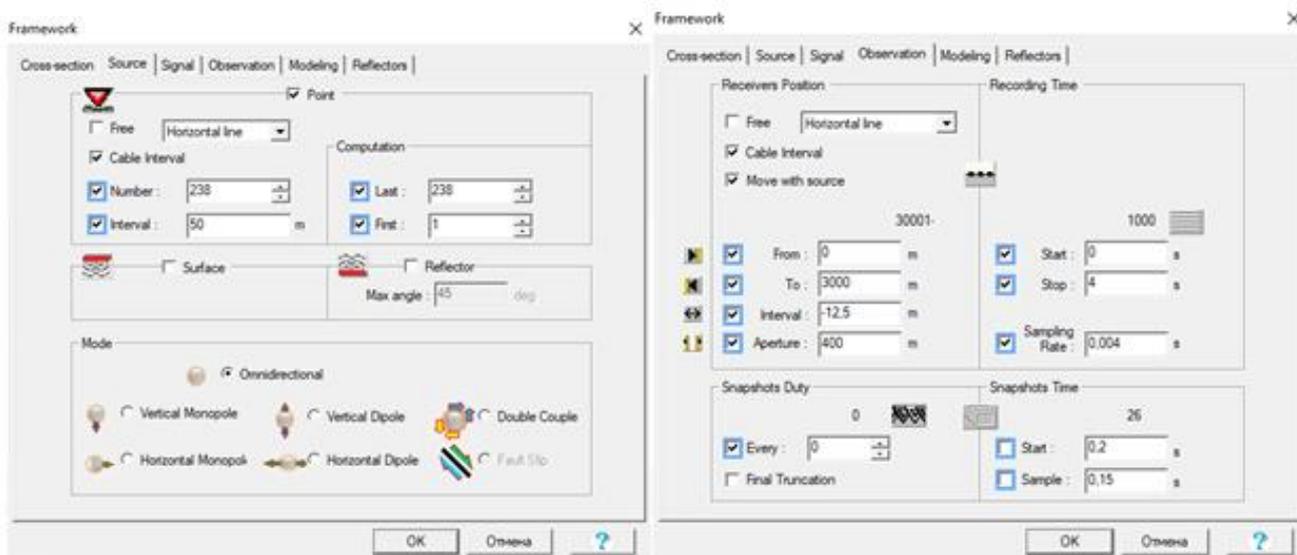


Рисунок 17. Окна программы с информацией об источниках и приёмниках

При заданных параметрах в этой же программе мною были смоделированы сейсмограммы данного геологического разреза (рисунок 18). Режим «Invisible» был выбран для подавления дифрагированных волн при расчленённом рельефе. Моделирование было проведено на основе акустического волнового уравнения. В таком подходе полностью игнорируется упругость твердой среды, что не дает возможности распространяться поперечным и обменным волнам, т.е. изучение разреза происходит только с помощью продольных волн. В качестве свойств среды в данном моделировании используется только скорость волн сжатия и плотность среды.

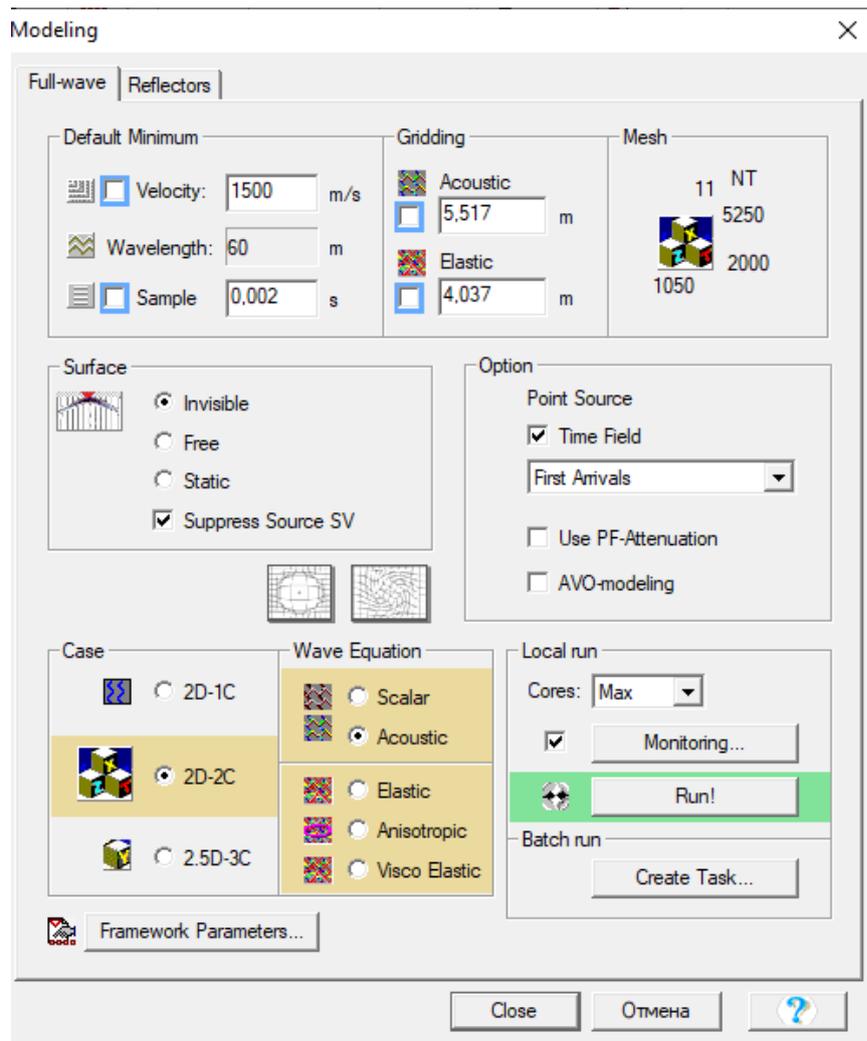


Рисунок 18. Окно программы с параметрами для моделирования

На всех сейсмограммах, смоделированных на местах, где рельеф ровный, наблюдается три типа волн: прямая волна, отраженная волна от второго слоя модели, отраженная волна от третьего слоя (рисунок 19).

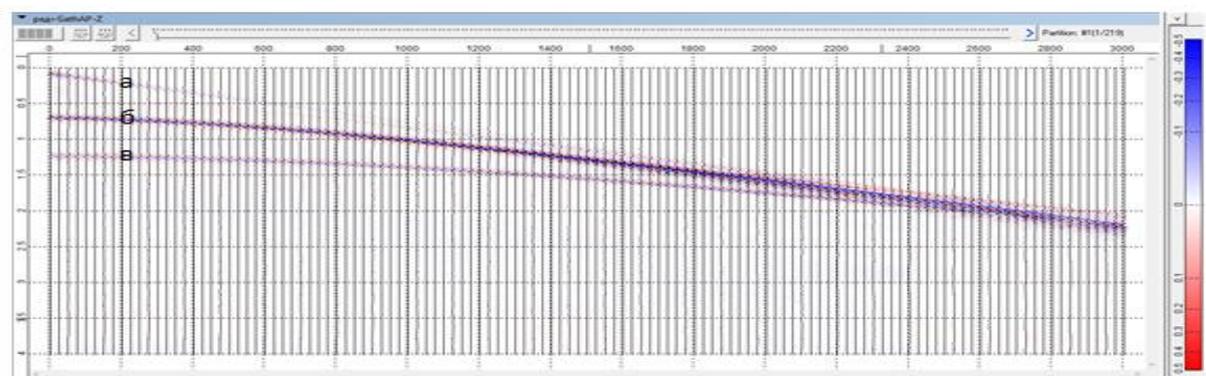


Рисунок 19. Первая смоделированная сейсмограмма, прямая волна - а; б, в - отраженные волны от второго и третьего слоя, соответственно

На сейсмограммах между 6000м и 9000м наблюдается: прямая волна, отраженная волна и множество дифрагированных волн, которые свидетельствуют о наличии расчленённого рельефа (рисунок 20, 21).

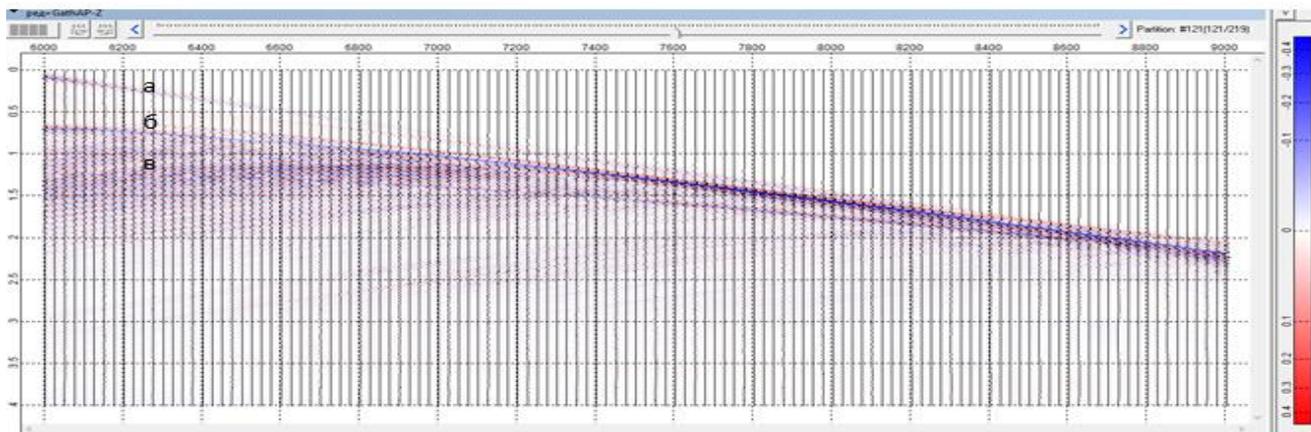


Рисунок 20. Сейсмограмма на расстоянии 7600м от начала модели, а - прямая волна; б - отраженная волна; в - дифрагированные волны

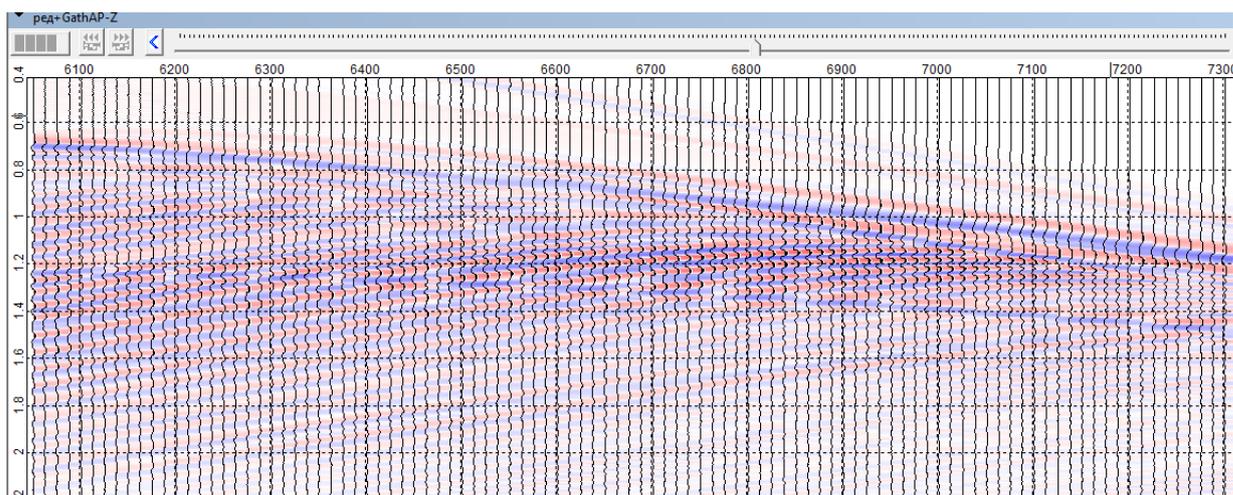


Рисунок 21. Дифрагированные волны в увеличенном масштабе на сейсмограмме

По результатам проведенных тестов оказалось, что математическое моделирование волнового поля в имеющейся версии программы Tessseral 7.2.8 не учитывает рассеяние сейсмических волн на неоднородностях как один из механизмов затухания сейсмических волн. На рисунках 22 и 23 показаны результаты обработки модельных данных для простейшей среды в программе RadExPro. Теоретически, нижняя горизонтальная граница должна быть неустойчивой и характеризоваться пониженными амплитудами непосредственно на участке, расположенном под шероховатой границей, поскольку

значительная часть энергии за счет дифракционного рассеяния уходит на образование интенсивных дифрагированных волн. Однако такого не происходит.

Программа учитывает только затухание амплитуд, вызванное поглощением энергии за счет ее перехода в тепловую, что никак не позволяет решить поставленную задачу.

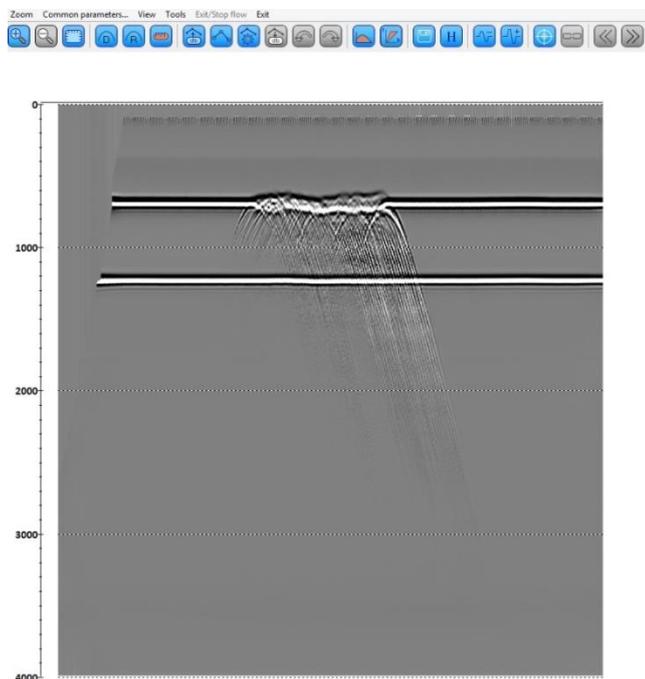


Рисунок 22. Временной разрез ОСТ без миграции (длина модели 12 км, по вертикальной оси – время в мс). Нормировка амплитуд отсутствует

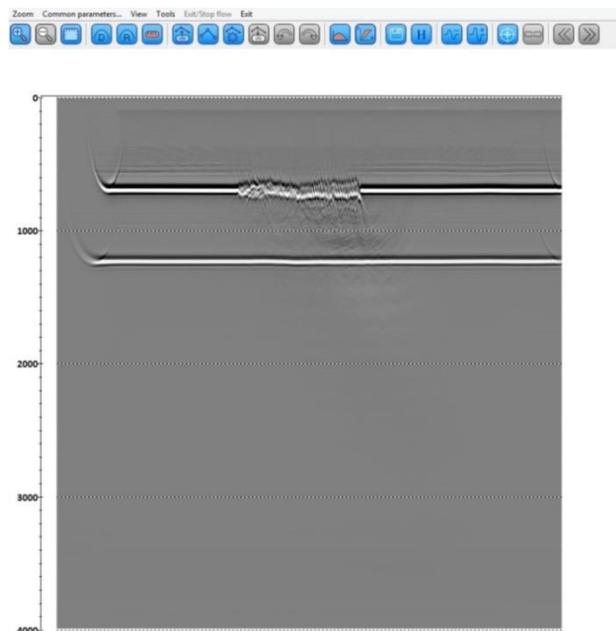


Рисунок 23. Мигрированный после суммирования временной разрез ОСТ (длина модели 12 км, по вертикальной оси – время в мс). Нормировка амплитуд отсутствует.

3.2. Физическое моделирование

Было решено провести серию экспериментов с использованием физического моделирования с целью дать экспериментальную оценку затуханию сейсмических волн за счет геометрической шероховатости придонных границ и оценить вклад этого эффекта в получаемое изображение среды по профилю AR1403.

Эксперимент состоит из нескольких частей и суть его заключается в следующем:

В первой части эксперимента берётся блок капролона небольшого размера (верхняя и нижняя грани горизонтальны и параллельны друг другу). Толщина блока выбирается во много раз больше длины волны (в нашем случае чуть больше, чем в 10 раз), чтобы не происходила интерференция.

Доминирующая частота ν – 200КГц (200000Гц), скорость распространения волны в воде ϑ – 1500м/с. Длину волны можно вычислить по формуле:

$$\lambda = \frac{\vartheta}{\nu} = \frac{1500\text{м/с}}{200000\text{Гц}} = 0.0075\text{м} = 7.5\text{мм}$$

На верхней грани с использованием фрезерного или лазерного станка ЧПУ формируется геометрическая шероховатость синусоидальной формы таким образом, шаг между гребнями синусоид составляет: 1.25мм, 1.875мм, 3.75мм, 5мм, 7.5мм, 11.25мм, 15мм (рисунок 24).

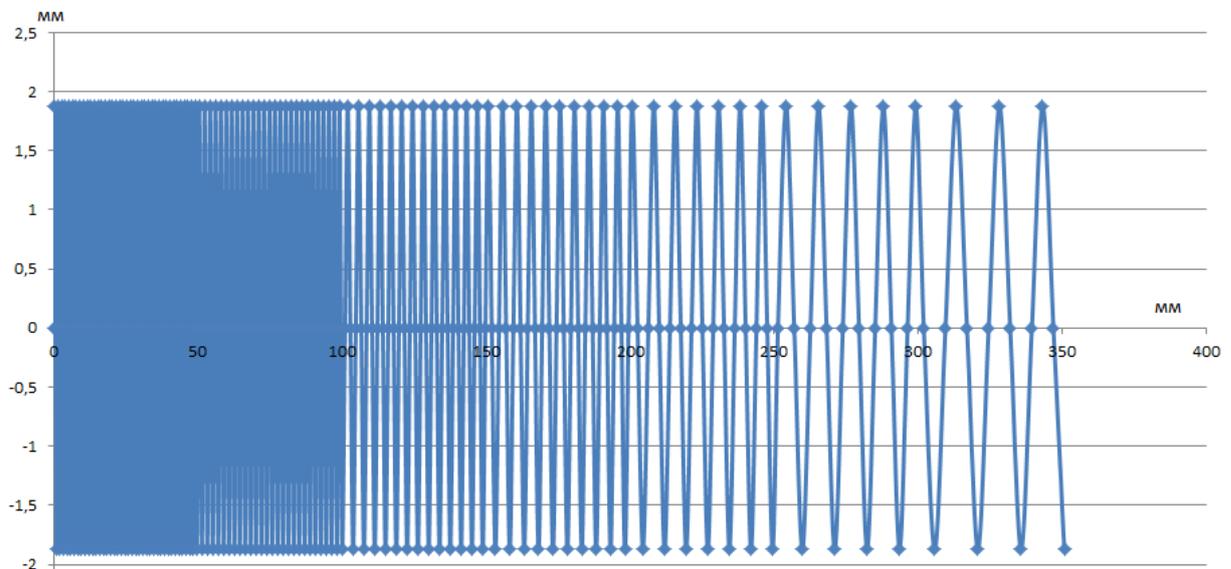


Рисунок 24. Общий вид шероховатости на верхней части блока

Все это сформировано одновременно на одном блоке, синусоиды ориентированы перпендикулярно линии профиля (2.5D шероховатость) и частота синусоид выдерживается на протяжении определенного интервала (рисунок 25, 26). По краям блока верхняя граница

гладкая (краевые эффекты, естественно, также были учтены). Для корректности, длина каждого участка с фиксированными параметрами шероховатости должна в два раза превышать длину приемной расстановки (в нашем случае длина каждого участка 5 см). Абсолютный перепад между гребнями постоянен и равен $\lambda/2=3.75\text{мм}$.

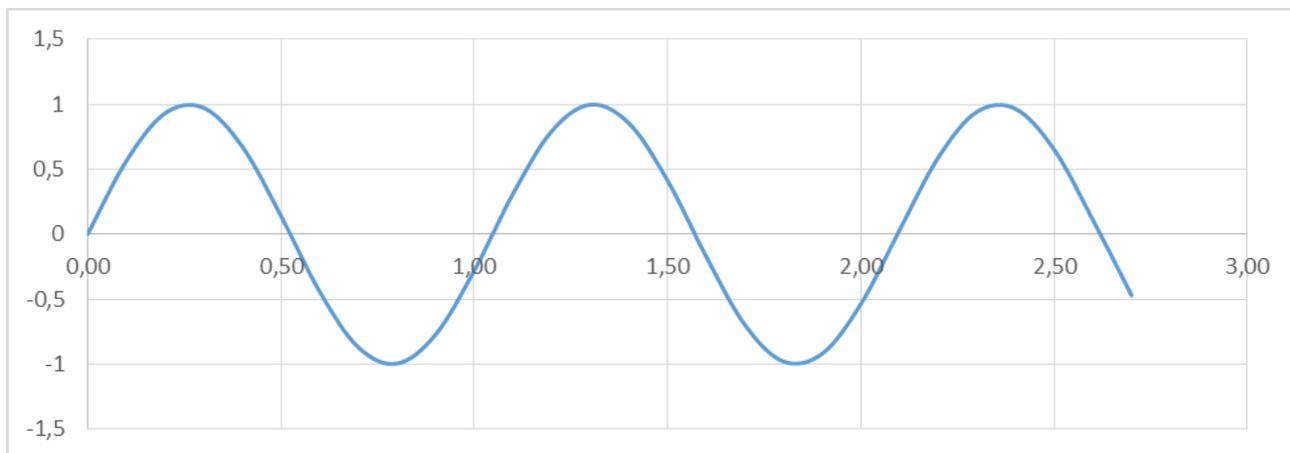


Рисунок 25. Шаг между гребнями – λ (соизмерим с длиной волны)

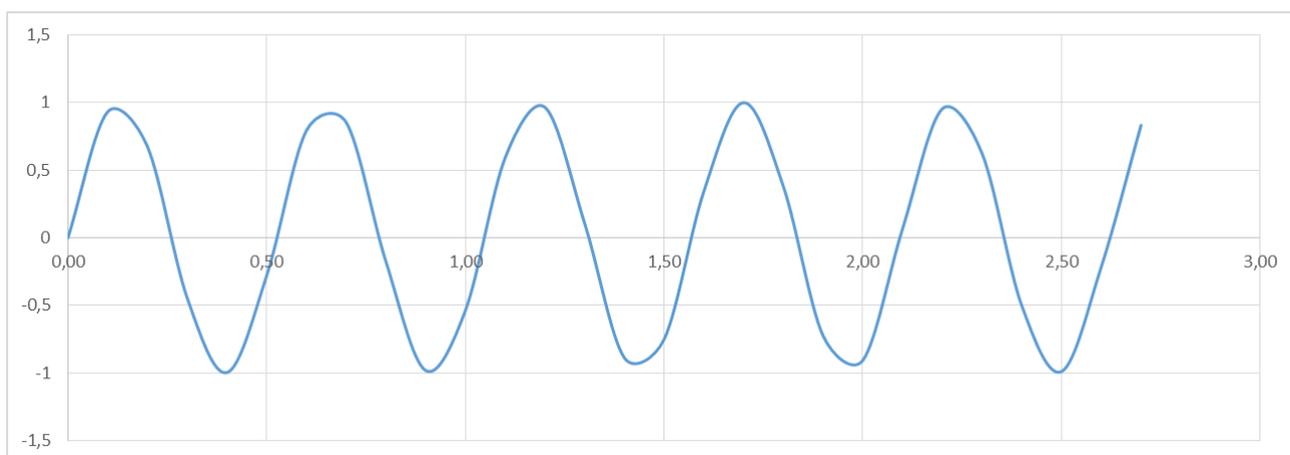


Рисунок 26. Шаг между гребнями – $\lambda/2$ (половина длины волны)

Далее блок капролона погружается в бак с водой и проводится 2D моделирование МОВ-ОГТ. После обработки оценивается (в процентах) затухание амплитуд в зависимости от конкретного соотношения $\lambda/6$; $\lambda/4$ относительно краев модели (где рассеяние на неоднородностях отсутствует в принципе).

Вторая часть эксперимента, идентична первой части, с той лишь разницей, что физические свойства модели иные. Это необходимо сделать для того, чтобы убедиться, что конкретные коэффициенты отражения не будут влиять на полученный результат, выраженный в процентах (а теоретически так и должно быть).

Третья часть эксперимента заключается в повторении неровного рельефа морского дна конкретного участка профиля AR1403 (рисунок 27) на поверхности капролона, сам участок можно оставить горизонтальным.

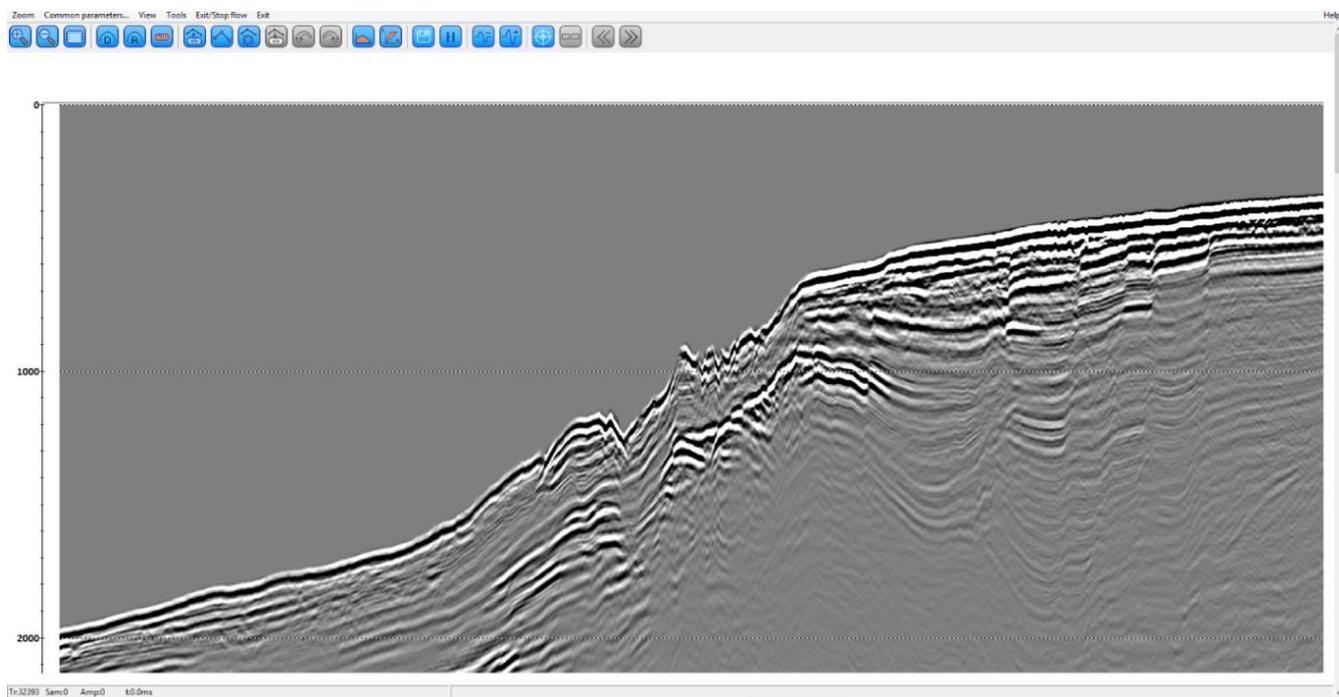


Рисунок 27. Рельеф морского дна конкретного участка профиля AR1403

В результате должна быть получена оценка (в процентах) вклада эффекта рассеяния на геометрических неоднородностях в затухание сейсмического сигнала в случае одной границы среды. Учитывая, что ниже поверхности дна в реальности несколько шероховатых границ, то полученные оценки легко адаптировать под несколько границ простейшими математическими расчетами.

В итоге должен был получиться следующий результат: на сколько децибел может понизиться амплитуда сигнала от отражающих границ в зоне неровного дна относительно границ, расположенных в правой и левой частях профиля (там, где дно гладкое) и как соотносится результирующая амплитуда с уровнем шума на сейсмической записи. К сожалению, как уже говорилось выше, выполнить эксперимент для уже подготовленной физической модели в настоящее время не представляется возможным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения работы было сделано следующее:

1. Изучены теоретические аспекты затухания сейсмических сигналов при их распространении в реальных средах;
2. Выполнено математическое моделирование дифрагированных волн, показавшее, что эффект рассеяния не учитывается при затухании амплитуд. Это верно для большинства индустриальных пакетов, используемых в сейсморазведке, поскольку они нацелены на решение других задач, не связанных с изучением дифракционного рассеяния.
3. Изучен граф обработки реальных сейсмических данных по профилю AR1403.
4. Потеря прослеживаемости отражающих горизонтов на сейсмическом разрезе может быть обусловлена рассеянием на неоднородностях в верхней части разреза. Математическое моделирование показало, что для корректной оценки вклада рассеяния в формирование волновой картины по профилю AR1403 (Арктика) необходимо выполнить физическое моделирование.

К сожалению, выполнить физический эксперимент в настоящее время не представляется возможным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ампилов Ю.П. Поглощение и рассеяние сейсмических волн в неоднородных средах // «Недра», г. Москва, 1992 г.
2. Безъязыков А.В. Ш.А.А. Цифровая обработка сейсмических данных МОВ - ОГТ 2Д, полученных для обоснования внешней границы континентального шельфа (ВГКШ) в СЛО // Москва, 2015.
3. Боганик Г.Н. Г.И.И. Сейсморазведка: Учебник для вузов. // 2006. 744 с.
4. Бондарев В.И. Сейсморазведка // Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, 2007 г., 703 стр.
5. Гелдарт Л., Шерифф Р. Сейсморазведка // МИР, Москва, 1987. Т.1. С. 448
6. Гусев А.А., Гусева Е.М. ОЦЕНКА ЗАТУХАНИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН В СРЕДЕ ВБЛИЗИ ст. “ПЕТРОПАВЛОВСК”, КАМЧАТКА, ПО СПАДУ СПЕКТРА // Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский 2016г.
7. Пискарев А.Л. Арктический бассейн (геология и морфология) // Спб.: ВНИИОкеангеология, 2016. С 291.
8. Лекции Сакулиной Т. С.