

Санкт-Петербургский государственный университет

Мусралиев Арман Жарасович

Выпускная квалификационная работа

**«Спектральная инверсия как инструмент динамического анализа
сейсмического волнового поля»**

Уровень образования: магистратура

Направление 05.04.01 «Геология»

Основная образовательная программа ВМ.5515.2018. «Геология»

Научный руководитель:
доцент кафедры геофизики
Института наук о Земле,
кандидат физ.-мат. наук
Сакулина Тамара Сергеевна

Рецензент:
Ведущий эксперт,
ООО «Газпромнефть НТЦ»,
Доктор геол.-мин. наук,
Ольнева Татьяна Владимировна

Санкт-Петербург

2020 год

АННОТАЦИЯ

Целью работы является оценка применимости спектральной инверсии для динамической интерпретации сейсмических данных.

В ходе работы была осуществлена спектральная декомпозиция по двум алгоритмам (вейвлет-преобразование и спектральная инверсия) на модельных и реальных данных. Спектральная декомпозиция была выполнена с помощью языка программирования Python версии 3.7, в оболочке Jupyter. Результатами спектральной инверсии являются графики распределения амплитуд по отдельным гармоникам, частотные срезы, RGB-разрезы, а также срезы кубов коэффициентов аппроксимации (вейвлет-зависимых коэффициентов отражения). Выполнено сравнение двух алгоритмов вейвлет – анализа; спектральной инверсии и вейвлет-преобразования. Результаты спектральной инверсии позволяют более однозначно выделять в разрезе тонкие геологические объекты, палеоканалы, и конусы выноса, что является затруднительным при других методах спектральной декомпозиции.

Магистерская работа выполнена на 56 страницах, она включает в себя 29 иллюстраций, 2 таблицы. Структура работы представлена введением, тремя главами, заключением и списком литературы, который состоит из 17 литературных источников.

Ключевые слова: сейсморазведка, динамическая интерпретация, спектральная декомпозиция, преобразование Фурье, вейвлет-преобразование, спектральная инверсия.

ABSTRACT

The aim of the work is to assess the applicability of spectral inversion for the dynamic interpretation of seismic data.

In the course of the work, spectral decomposition was performed according to two algorithms (wavelet transform and spectral inversion) on model and real data. Spectral decomposition was performed using the Python programming language version 3.7, in the Jupyter shell. Spectral inversion results in graphs of the distribution of amplitudes for individual harmonics, frequency slices, RGB slices, as well as cubes of cubes of approximation coefficients (wavelet-dependent reflection coefficients). The comparison of two wavelet analysis algorithms is performed; spectral inversion and wavelet transform. The data obtained make it possible to more accurately distinguish thin geological objects, paleochannels, and drift cones in the section, which is difficult with standard spectral decomposition methods.

The master's work was done on 56 pages, it includes 29 illustrations, 2 tables. The structure of the work is presented by introduction, three chapters, conclusion and list of references, which consists of 17 literary sources.

Keywords: seismic exploration, dynamic interpretation, spectral decomposition, Fourier transform, wavelet transform, spectral inversion.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 МЕТОДЫ СПЕКТРАЛЬНОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ	7
1.1 Преобразование Фурье	8
1.2 Вейвлет-преобразование.....	11
1.3 Спектральная инверсия	14
1.3.1 Требования к вейвлетам	17
1.4 Визуализация результатов спектральной декомпозиции	19
2 ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА СПЕКТРАЛЬНОЙ ИНВЕРСИИ НА МОДЕЛЬНЫХ ДАННЫХ	21
2.1 Моделирование волнового поля.....	21
2.2 Сопоставление амплитудных графиков и спектров вейвлет-преобразования и спектральной инверсии	23
2.3 Анализ информативности разрезов цветового смешивания (RGB).....	29
2.4 Использование коэффициентов отражения для повышения разрешающей способности волнового поля.....	32
3 ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА СПЕКТРАЛЬНОЙ ИНВЕРСИИ НА РЕАЛЬНЫХ ДАННЫХ	34
3.1 Геологическое описание района исследования	34
3.1.1 Литолого-стратиграфическая характеристика.....	34
3.1.2 Тектоническое строение.....	39
3.2 Описание сейсмических данных	42
3.3 Результаты спектральной инверсии на реальных данных	44
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	53
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:.....	55

ВВЕДЕНИЕ

Информация о частотном составе сейсмических записей широко применяется при динамической интерпретации волнового поля для решения разных задач: прогнозирования мощности коллектора, анализа тонких геологических объектов, таких как палеоканалы и рифовые постройки, оценки затухания сейсмического сигнала, а также для возможного прогнозирования углеводородов по особенностям частотного состава [1].

Магистерская работа посвящена применению спектральной инверсии в качестве инструмента динамического анализа сейсмического волнового поля.

Актуальность данной работы связана с использованием новых методов интерпретации сейсмического волнового поля, в частности, обоснование использования спектральной инверсии, как инструмента динамического анализа в сравнении со стандартными методами частотной декомпозиции.

Цель исследования: оценка применимости спектральной инверсии для интерпретации сейсмических данных.

Выполнение поставленной цели предусматривает **решение ряда задач**, которые связаны с используемой методикой спектральной декомпозиции:

- Изучения разных методов спектральной декомпозиции;
- Оценка возможностей спектральной инверсии на модельных данных;
- Оценка эффективности применения спектральной инверсии на реальных данных.

Решение задач позволит оценить применимость метода спектральной инверсии для интерпретации сейсмических данных.

Алгоритмы вейвлет-преобразования и спектральной инверсии реализованы на языке программирования Python, поэтому его изучение являлось дополнительной задачей.

Научная новизна связана с развитием метода спектральной инверсии для динамического анализа сейсмических данных, а также сравнение его со стандартными подходами к спектральной декомпозиции.

Практическая значимость исследования связана с изучением и апробацией нового подхода к спектральной декомпозиции волнового поля, а также возможности его применения на модельных и реальных сейсмических данных.

Работа выполнена в объеме 56 страниц, *в структуре работы* выделено несколько этапов, которые последовательно раскрыты в текстовой части выпускной квалификационной работы.

Работа выполнялась с использованием материалов, предоставленных **ООО «Газпромнефть-НТЦ»**, где автор проходил производственную практику и стажировку.

На основании имеющейся научной литературы рассмотрены основные методы спектральной декомпозиции волнового поля. В работе изучены теоретические основы методов, их преимущества и недостатки. Современные методы частотного анализа насчитывают несколько подходов, которые разделены на три класса. Первым классом являются алгоритмы связанные с преобразованием Фурье – непосредственно преобразование Фурье и его оконный аналог. Вторым классом методов связан с вейвлет-анализом – этот метод носит название вейвлет-преобразование. Третьим классом связан с вейвлет-анализом, однако отличается реализацией – этот класс называется спектральная инверсия.

Вторым этапом является создание трехмерной модели выклинивающегося пласта переменной акустической жесткости, с помощью математического моделирования на языке программирования Python. Модельное волновое поле изучалось при помощи двух методов спектральной декомпозиции (вейвлет-преобразование и спектральная инверсия), что позволит оценить возможности спектральной инверсии на модельных данных.

Также опробованы различные методы визуализации результатов декомпозиции (графики амплитуд для отдельных гармоник, частотные срезы кубов, RGB-визуализация) для установления оптимального подхода к визуализации.

Спектральная инверсия применялась к реальным данным, на одном из месторождений Нефтеюганского района Ханты-Мансийского автономного округа, для оценки эффективности результатов спектральной инверсии на практическом кейсе.

Автор выражает благодарность научному руководителю Сакулиной Тамаре Сергеевне за помощь в написании работы, за профессиональные советы и поддержку во время написания работы. Также автор выражает благодарность ООО «Газпромнефть-НТЦ», и лично Буторину Александру Васильевичу за возможность прохождения производственной практики и стажировки, за предоставленные материалы для написания работы, а также за научную консультацию и помощь при написании работы.

1 МЕТОДЫ СПЕКТРАЛЬНОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ

История частотного разложения происходит от таких ученых, как Бернулли, Эйлер и, конечно, Фурье. Именно Фурье впервые построил теорию разложения функций в тригонометрические ряды. Впоследствии, в течение многих лет, это разложение использовалось в качестве математического приема и не было связано с какой-либо физической концепцией. Спектральные представления были развиты относительно небольшим кругом физиков-теоретиков, но с 1920-х годов 20-го века, благодаря быстрому развитию науки и техники, спектральные представления приобрели физическое значение и широкое практическое применение [7].

Спектральная декомпозиция волнового поля – это разложение сейсмического сигнала на частотные составляющие. Волновое поле рассматривается как суперпозиция компонент с разной частотой, которые меняются вдоль всей сейсмической трассы, эти изменения могут быть обусловлены влиянием геологические условия среды на частотный состав записи. В основе спектральной декомпозиции лежит предположение о том, что локальное изучение спектра волнового поля позволяет получить больше информации о внутреннем строении геологических объектов.

Спектральная декомпозиция применяется при динамической интерпретации сейсмических данных для решения целого ряда задач, таких как [1]:

- 1) Выделение тонких геологических объектов таких, как палеоканалы, рифовые постройки;
- 2) Изучение областей выклинивания (клиноформ);
- 3) Оценка мощности коллектора;
- 4) Оценка степени затухания сейсмического сигнала;
- 5) Прогнозирование наличия углеводородов по особенностям частотного состава записи.

Методы частотной декомпозиции разделены на несколько классов [1]. Первый класс методов использует в своей основе преобразование Фурье: (прямое преобразование Фурье и его оконный вариант (преобразование Гэбора) для получения спектральных характеристик сигнала. Второй класс алгоритмов основан на вейвлет-преобразовании, которое предусматривает разложение сейсмической трассы по заданным вейвлетам определенной частоты. Третий класс алгоритмов связан с вейвлет-анализом, однако отличается от вейвлет-преобразования самой постановкой задачи декомпозиции (использованием библиотеки вейвлетов). Данное направление получило название спектральная инверсия волнового поля.

1.1 Преобразование Фурье

В основе спектрального анализа сигналов лежит интегральное преобразование и ряды Фурье. В сейсморазведке наиболее распространенным в контексте спектрального разложения является анализ по базису гармонических функций, которые представлены в виде комплексных экспонент. Эти базисные функции расположены вдоль всей оси времен, то есть являются бесконечными гармониками, которые охарактеризованы собственной частотой, амплитудой и фазой [7].

$$S(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t)e^{-i2\pi ft} dt \quad (1)$$

где: $S(f)$ – спектральные характеристики,
 $s(t)$ – анализируемый сигнал.

Совокупность амплитудных характеристик гармоник составляет амплитудно-частотный спектр трассы, а совокупность фазовых характеристик – фазово-частотный спектр. Операция разложения получила большое распространение в цифровой обработке сигнала, потому что она позволяет представить сигнал, который задан во временной области, в виде его частотных характеристик (рис.1).

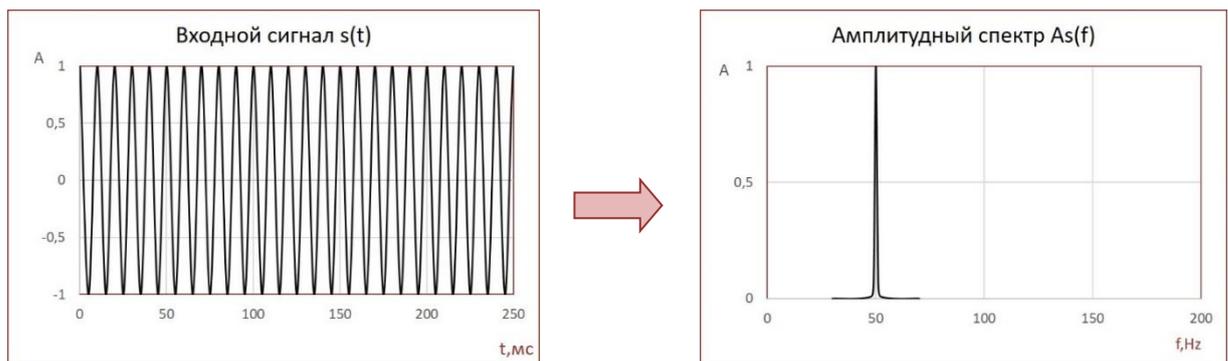


Рисунок 1 Преобразование Фурье стационарного сигнала $s(t)$ и его амплитудно-частотная характеристика $A_s(f)$

Для понимания результатов спектральной декомпозиции необходимо представить сейсмическую трассу в виде сверточной модели:

$$s(t) = e(t) * w(t) + n(t) \quad (2)$$

где: $s(t)$ – сейсмическая трасса,

$e(t)$ – трасса коэффициентов отражения,

$w(t)$ – сложный сейсмический импульс,

$n(t)$ – аддитивная помеха.

В рамках этой модели сейсмическая трасса представляется как результат свертки трассы коэффициентов отражения с неким сложным сейсмическим импульсом, а также наложением аддитивной помехи.

С точки зрения анализа произвольных сигналов и функций в частотной области и точного восстановления после преобразований можно отметить ряд ограничений преобразования Фурье [17]:

- Ограниченная возможность анализа нестационарных сигналов (рис. 2). Результат преобразования Фурье одинаковый для стационарного сигнала, представленного суммой ряда синусоид, и нестационарного сигнала с несколькими последовательно следующими синусоидами с теми же частотами, т.к. спектральные коэффициенты вычисляются интегрированием по всему интервалу задания сигнала;
- Преобразование Фурье отображает сведения о частотах сейсмического сигнала по всему исследуемому временному интервалу трассы, и не дает представления о локальных свойствах сигнала при быстрых изменениях во времени его спектрального состава;
- Преобразование Фурье не дает возможности анализировать частотные характеристики сигнала в произвольные моменты времени.

Частичным выходом из этой ситуации является оконное преобразование Фурье (STFT) с движущейся по сигналу оконной функцией [12].

$$STFT_x^{(\omega)}(t', f) = \int_{-\infty}^{+\infty} [s(t) \cdot \omega^*(t - t')] \cdot e^{-i2\pi f t} dt \quad (3)$$

Где: $s(t)$ – исходный сигнал,

$\omega(t-t')$ – оконная функция (в ней t' – сдвиг окна по времени),

* – означает комплексное сопряжение.

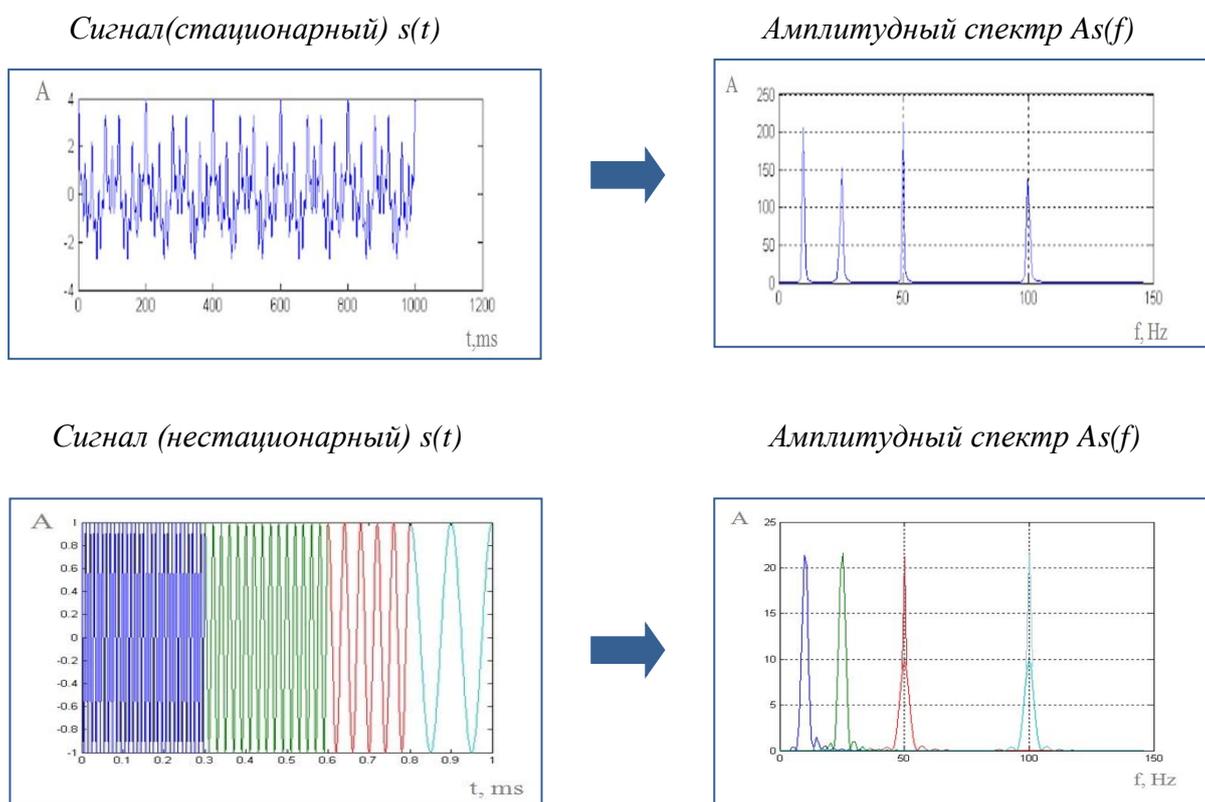


Рисунок 2 Стационарный и нестационарный сигналы (слева) и их амплитудно-частотные характеристики (справа)

Таким образом, в рамках оконного преобразования Фурье применяется предварительная операция умножения сигнала на «функцию окна». Использование функции окна позволяет локально изучить спектр сигнала во времени, то есть в разных позициях времени t' . Результатом оконного преобразования является семейство спектров, на которых отображается изменение спектра сигнала по интервалам сдвига окна преобразования. Это позволяет выделять и анализировать особенности нестационарных сигналов.

Окно преобразования фиксировано, что, в свою очередь, накладывает ограничения на частотную и временную разрешенность результатов. Если использовать слишком узкое окно (рис. 3), это позволит получить лучшую детализацию по времени, однако сократит разрешающую способность в частотной области.

Выбирая широкое окно (рис. 4), можно хорошо выделить низкочастотные компоненты, но ширина окна будет излишней для гармоник высокой частоты.

Ввиду вышеупомянутых ограничений преобразования Фурье в скользящем окне, логичен переход к частотно-зависимым окнам анализа, при которых ширина окна может изменяться для каждой из гармоник в зависимости от частоты. Этот метод имеет

название S-преобразование, оно является переходным к классу, получившему название вейвлет-анализ.

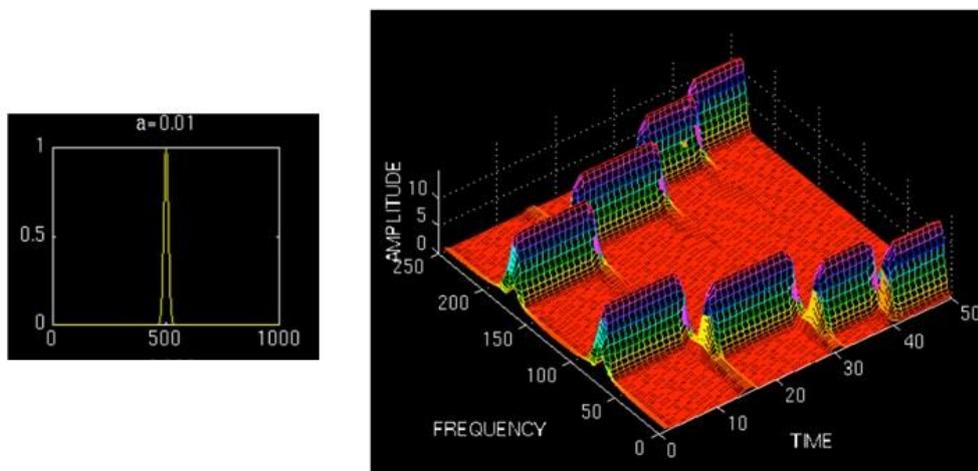


Рисунок 3 Оконное преобразование Фурье в узком окне, оконная функция (слева), результат преобразования (справа) (Polikar R., 2006)

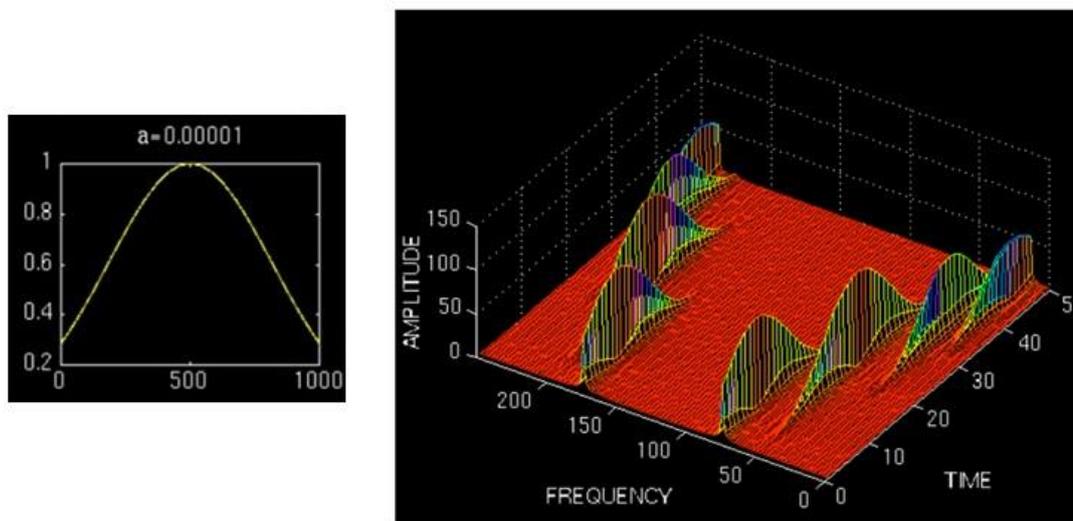


Рисунок 4 Оконное преобразование Фурье в широком окне, оконная функция (слева), результат преобразования (справа) (Polikar R., 2006)

1.2 Вейвлет-преобразование

Вейвлет-анализ - это вид спектрального анализа, в котором роль простых колебаний играют функции особого типа, называемые «вейвлетами» [14,15]. В литературе термин «вейвлет» может трактоваться как «короткая волна», «всплеск» и т.д. Вейвлеты имеют вид коротких волновых пакетов с нулевым интегральным значением,

локализованных по оси аргументов, способных к сдвигу по оси и линейных к операции масштабирования (сжатия/растяжения). Каждый вейвлет, который используется в вейвлет-преобразовании, должен порождать ортогональную функцию. Благодаря малой временной длительности и способности вейвлета к масштабированию этот тип декомпозиции позволяет изучить локальные временные особенности нестационарных процессов, протекающих во времени. Это является основным преимуществом над преобразованием Фурье, даже когда речь идет о его оконной модификации.

Областью применений вейвлет-преобразования является анализ сигналов и функций, нестационарных во времени или неоднородных в пространстве. Результаты анализа этих функций должны содержать как частотные характеристики сигнала, так и сведения о локальных координатах, на которых проявляют себя те или иные группы частотных составляющих. По сравнению с разложением сигналов на ряды Фурье вейвлеты способны с гораздо более высокой точностью представлять локальные особенности сигналов.

Вейвлет-преобразование одномерного сигнала заключается в его представлении в виде обобщенного ряда или интеграла Фурье по системе базисных функций [7,10]:

$$\Psi = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (4)$$

где $\psi(t)$ – материнский (исходный) вейвлет,

Множитель $\frac{1}{\sqrt{a}}$ обеспечивает независимость нормы этих функций от масштабирующего множителя,

a – масштаб вейвлета,

b – сдвиг вейвлета по времени

Свойство масштабируемости вейвлета позволяет изменять его доминантную частоту, то есть частотный состав вейвлета. Значения масштабирующего множителя $a < 1$ сжимают сигнал и позволяют получить высокочастотные вейвлеты, если же значения масштабирующего множителя будут $a > 1$, это приводит к получению низкочастотных вейвлетов. Использование коэффициента, изменяющего масштаб вейвлета, приводит к сжатию или растяжению вейвлета во временной области и, соответственно, к увеличению или уменьшению его частоты. В результате библиотека разномасштабных вейвлетов позволяет изучить сигнал на разных спектральных уровнях.

Возможность сдвигать вейвлет вдоль временной оси позволяет изучать сигнал на разных временных уровнях, что делает вейвлет-преобразование инструментом для динамического анализа сейсмического волнового поля.

Выполнение вейвлет-преобразования начинается с выбора материнской функции, после формирования материнского вейвлета он помещается в начало анализируемой трассы, в точку, соответствующую нулевому времени. Далее происходит сопоставление вейвлета с участком трассы, этот процесс можно описать вычислением коэффициента корреляции между вейвлетом и анализируемым участком трассы. Следующим шагом является сдвиг вейвлета на шаг дискретизации и вычисление нового коэффициента корреляции. Данная последовательность действий выполняется для каждого масштабированного вейвлета. На рисунке 5 представлена схематичная последовательность выполнения вейвлет-преобразования.

В результате выполнения вейвлет-преобразования получаются трёхмерные изображения, на которых по оси X отложены значения масштаба вейвлета, по оси Y временной сдвиг, а по оси Z значения амплитуд.

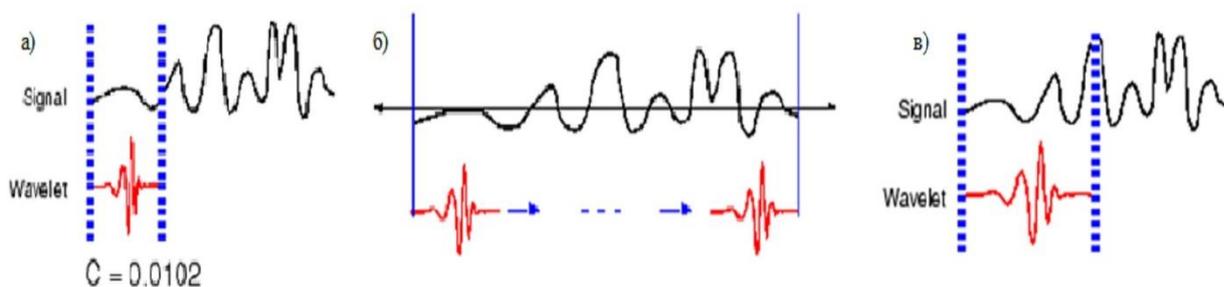


Рисунок 5 Схема выполнения вейвлет-преобразования, а) корреляция вейвлета с участком трассы, б) сдвиг вейвлета по времени, в) изменение масштаба вейвлета

Для нестационарного сигнала, который имеет частоты 30, 20, 10, 5 Гц. вейвлет-преобразование показано на рисунке 6 [17].

Описанные выше свойства позволяют говорить о возможности локализации сейсмических сигналов как во временной, так и в частотной области.

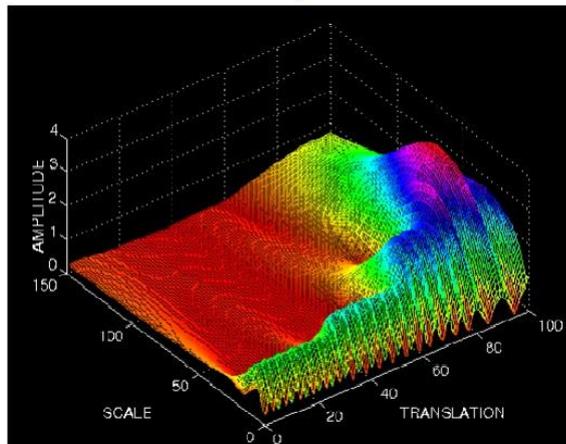
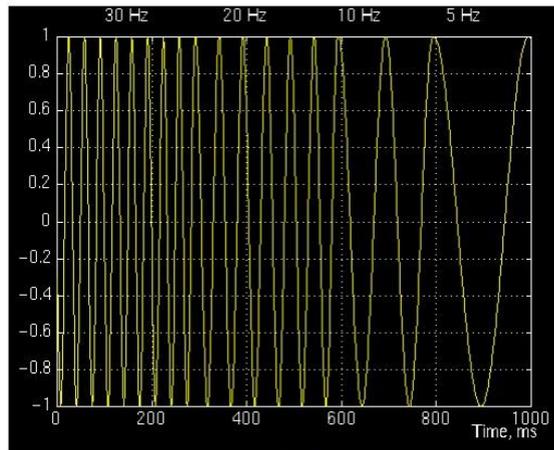


Рисунок 6 Сигнал и его вейвлет-преобразование (по X-масштаб, по оси Y-временной сдвиг) (Polikar R., 2006)

1.3 Спектральная инверсия

Спектральная декомпозиция, выполненная по алгоритму спектральной инверсии, позволяет наиболее детально реконструировать спектр сигнала, что, в свою очередь, позволяет более точно изучить характеристики распределения энергии по частотам. Но использование этой технологии в настоящее время не распространено для интерпретации сейсмических данных

В рамках алгоритма спектральной инверсии [1] сейсмическую трассу можно представить в виде мультивейвлетной сверточной модели:

$$s(t) = \sum_k^K [w(t, k) * e(t, k)] + n(t) \quad (5)$$

Здесь: $s(t)$ – сейсмическая трасса,

k – индекс определенного вейвлета $w(t,k)$ из библиотеки вейвлетов D , которому соответствует конкретная трасса коэффициентов отражения $e(t,k)$;

$n(t)$ – аддитивная помеха.

В результате сейсмическая трасса может быть описана комбинациями множества вейвлетов, каждый из которых соответствует вейвлет-зависимой трассе коэффициентов отражения (рис.7). Данная модель является физической абстракцией, однако если наборы вейвлетов в библиотеке будут отличаться друг от друга доминантной частотой, то такое представление может достаточно детально восстановить спектр волнового поля.

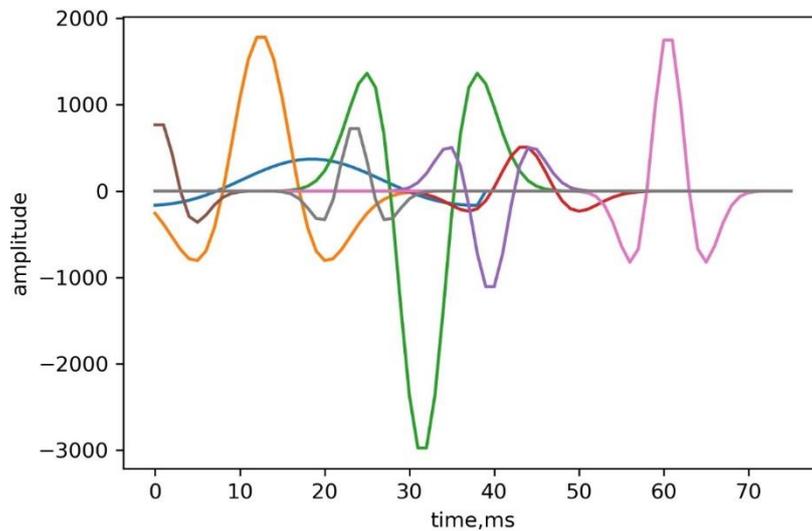


Рисунок 7 Пример описания сейсмической трассы с помощью четырех вейвлетов из библиотеки вейвлетов

Представленная сверточная модель может быть выражена в матричной форме:

$$s = (w_1 \dots w_k) \begin{pmatrix} r_1 \\ r_k \end{pmatrix} + n = Dm + n \quad (6)$$

где: D – матрица вейвлетов (библиотека вейвлетов),

m – матрица соответствующих вейвлет-зависимых коэффициентов отражения,

n – аддитивный шум.

Операция поиска вейвлет-зависимых коэффициентов отражения для конкретного набора вейвлетов является обратной задачей геофизики, которая некорректно поставлена. Следует отметить, что, во-первых, данная задача не имеет единственного решения, а, во-вторых, решение является неустойчивым, то есть малые изменения аргумента могут приводить к значительным вариациям функции.

Решение поставленной задачи линейной регрессии выполняется с использованием метода наименьших квадратов []:

$$J = \|s - Dm\|^2 \rightarrow \min \quad (7)$$

где J – функционал ошибки,

s – сейсмическая трасса,

D – матрица вейвлетов,

m – матрица вейвлет-зависимых коэффициентов отражения.

Для того чтобы избежать переобучения линейной регрессии, необходимо наложить ограничения на вариабельность решающего правила, подобный подход основан на методе регуляризации. С байесовской точки зрения регуляризация соответствует добавлению некоторых априорных распределений на параметры модели. Это позволяет рассматривать задачу поиска решения как оптимизацию регуляризованного функционала [3]:

$$\|s - Dm\|^2 + \lambda \|m\|_{L_p}^p \rightarrow \min, \lambda \geq 0 \quad (8)$$

Под символом $\|m\|_{L_p}$ понимается L_p норма вида $\sqrt[p]{\sum |m_j|^p}$, накладывающая определенное ограничение на результат решения [4].

В этой связи обычно рассматривают несколько типов регуляризации [4]:

- L_0 -регуляризация – задает количество весов отличных от нуля, в этом случае решение обладает свойством разреженности;

- L_1 -регуляризация – задает суммарное значение весов в рамках решения, в этом случае решение аналогично характеризуется разреженностью;

- L_2 -регуляризация – задает значение суммарной энергии весов, данный тип регуляризации был разработан А.Н. Тихоновым. В рамках регуляризации Тихонова строго нулевые веса в оптимальном решении практически невозможны.

Поиск решения касается области машинного обучения с использованием заданного словаря, в рамках которого выполняется поиск аппроксимации входной функции, то есть сейсмической трассы. Существуют различные типы L_p -регуляризации для решения задачи спектральной инверсии, которая заключается в аппроксимации входной сейсмической трассы вейвлет-зависимыми коэффициентами отражения для соответствующей библиотеки вейвлетов:

- Orthogonal matching pursuit (OMP)
- Lasso using coordinate descent (Lasso)
- Thresholding

Самым распространенным методом решения спектральной инверсии является алгоритм «согласованного преследования» (Matching pursuit). Суть алгоритма сводится к итеративному поиску элементов словаря, минимизирующих на каждом шаге ошибку аппроксимации. При использовании ортогонального базиса, данный метод представляет «ортогональное согласованное преследование» (Orthogonal matching pursuit) [4].

Для выполнения алгоритма спектральной инверсии в данном исследовании был выбран метод L_0 -регуляризации или «ортогональное согласованное преследование» (OMP), так как данный метод решения задачи спектральной инверсии обеспечивает наиболее разреженное решение, а значит, позволяет наиболее точно восстановить сигнал. Указанные алгоритмы были реализованы на языке программирования Python.

1.3.1 Требования к вейвлетам

В качестве исходного (материнского) вейвлета возможно использовать большое количество вейвлетов, однако для выполнения алгоритма спектральной инверсии, как и для непрерывного вейвлет-преобразования, все они должны характеризоваться определенными признаками [7]:

- 1) Частотно-временная локализация – вейвлеты и их спектральные представления Фурье отличаются от нуля лишь на коротких временных интервалах;
- 2) Нулевое среднее - вейвлет должен иметь нулевой момент для выполнения обратного преобразования, это значит, что его полный интеграл по времени должен равняться нулю;
- 3) Самоподобие вейвлета – форма базисных вейвлетов должна быть подобна материнскому вейвлету вне зависимости от масштаба и сдвига.

Из широко известных и наиболее используемых вейвлетов стоит выделить вейвлет Гаусса ($g_0=e^{-\frac{t^2}{2}}$), вейвлет Риккера, и, наконец, вейвлет Морле (рис. 8) [14,15]. В сейсморазведке самыми часто используемыми являются вейвлет Риккера, который также называют «Мексиканская шляпа», и вейвлет Морле.



Рисунок 8. Графическое изображение наиболее известных вейвлетов

Вейвлет Риккера получается путем двойного дифференцирования функции Гаусса:

$$\Psi(t) = \frac{t^2}{dt} e^{-\frac{t^2}{2}} \quad (9)$$

$$\Psi(\omega) = \sqrt{2\pi} \omega^2 e^{-\frac{\omega^2}{2}}$$

Стоит отметить, что вейвлет Риккера обладает хорошей локализацией, как по частоте, так и по времени. Его наибольшим достоинством является тот факт, что он схож с реальным сейсмическим сигналом, что оказывает положительное влияние на результаты частотной декомпозиции сейсмических данных.

Представление вейвлета Морле имеет вид [14]:

$$\Psi(t) = e^{-\frac{t^2}{a^2}} \left[e^{ik_0 t} - e e^{-\frac{k_0^2 a^2}{4}} \right] \quad (10)$$

$$\Psi(\omega) = a\sqrt{\pi} \left[e^{-\frac{a^2(k_0-\omega)^2}{4}} - e^{-\frac{a^2(k_0+\omega)^2}{4}} \right].$$

Вейвлет Морле – это плоская волна, модулированная гауссианой. Параметр «a» задает ширину гауссианы и обычно принимается равным 2. Параметр k_0 задает частоту

плоской волны и чаще всего приравнивается к 2π . При таких значениях аналитическое изображение сигнала Морле принимает вид [14,15]:

$$\begin{aligned}\Psi(t) &= e^{-\frac{t^2}{a^2}} e^{i2\pi} \\ \Psi(\omega) &= a\sqrt{\pi} e^{-\frac{a^2(2\pi-\omega)^2}{4}}\end{aligned}\tag{11}$$

Применение, в качестве материнского вейвлета, реальных сигналов, которые были извлечены из волнового поля, невозможно, так как они не удовлетворяют требованиям, которые были описаны выше.

1.4 Визуализация результатов спектральной декомпозиции

В качестве инструмента визуализации результатов спектральной декомпозиции могут быть использованы стандартные подходы – получение амплитудных срезов по различным направлениям. В настоящее время наравне со стандартными подходами к визуализации данных спектральной декомпозиции применяется технология цветового комбинирования (RGB-смешивания) [9].

В рамках RGB-визуализации реализуется следующий алгоритм (рис. 9):

1. На вход алгоритма подаются три различные амплитудно-частотные характеристики;
2. Каждой из гармоник присваивается свой цветовой код красного (R), зеленого (G) и синего (B) цвета;
3. Интенсивность цветовой визуализации зависит от значения амплитуды гармоники. Здесь отсутствие амплитуды характеризуется черным цветом, в свою очередь, максимальное значение амплитуды гармоники – наибольшей насыщенностью.

Таким образом, в результате выполнения алгоритма смешивания образуются три цветовых канала, которые описывают изменения амплитуд трех разных гармоник. Далее происходит объединение цветовых каналов. В результате объединения выходной срез в каждой точке имеет три значения амплитуды, и каждому значению соответствует свой цветовой канал.

В конечном итоге цвет массива, полученный на выходе определяется в рамках трехмерного цветового куба, описывающего все цвета путем комбинации красного, зеленого и синего цвето-кода.

Стоит отметить, что этот метод визуализации имеет ряд преимуществ по сравнению со стандартными подходами. Наиболее очевидным преимуществом является

факт лучшей цветовой дифференциации, по сравнению со стандартными атрибутами волнового поля, к тому же смена цвета отражает изменение спектральных характеристик поля. Использование трех гармоник одновременно позволяет изучить волновое поле сразу на нескольких масштабах, это открывает возможности для более детального анализа сейсмических данных. Использование гармоник в области доминантного значения частоты волнового поля позволяет получить срезы с меньшим вкладом шумовой компоненты.

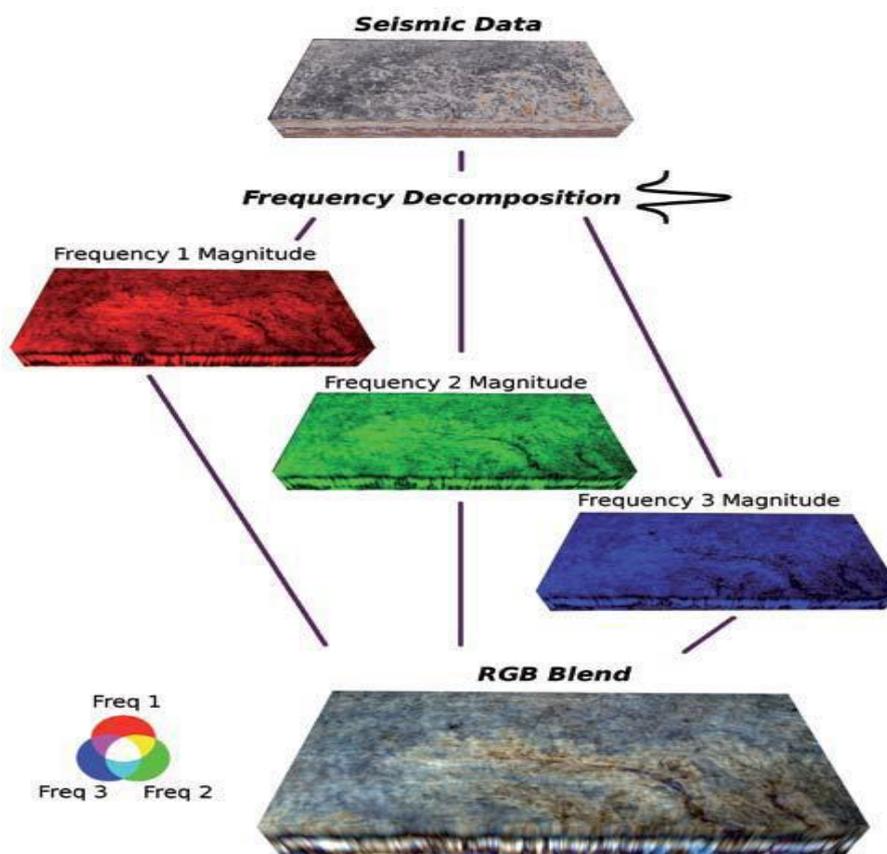


Рисунок 9 Алгоритм RGB-смешивания (N.J. McArdle и M.A. Ackers, 2011)

Однако существенным недостатком метода RGB-комбинирования является необходимость использования специализированных программных пакетов.

2 ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА СПЕКТРАЛЬНОЙ ИНВЕРСИИ НА МОДЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

Спектральная декомпозиция – это важный и информативный инструмент для изучения особенностей волнового поля, однако, для того, чтобы правильно применить методики необходимо понимать истинные причины, способные вызывать аномалии амплитудно-частотных характеристик. С целью исследования алгоритма спектральной инверсии был выполнен сравнительный анализ его результатов с результатами вейвлет-преобразования.

2.1 Моделирование волнового поля

Для изучения особенностей алгоритма спектральной инверсии была создана трехмерная модель с выклинивающимся пластом, которая имеет переменную акустическую жесткость (рис. 10). В этой модели, в одном из направлений происходит выклинивание пласта (направление x-line), а в направлении перпендикулярном выклиниванию (направление inline) происходит изменение акустической жесткости. Акустический импеданс вмещающей среды ниже и выше области выклинивания остается постоянным.

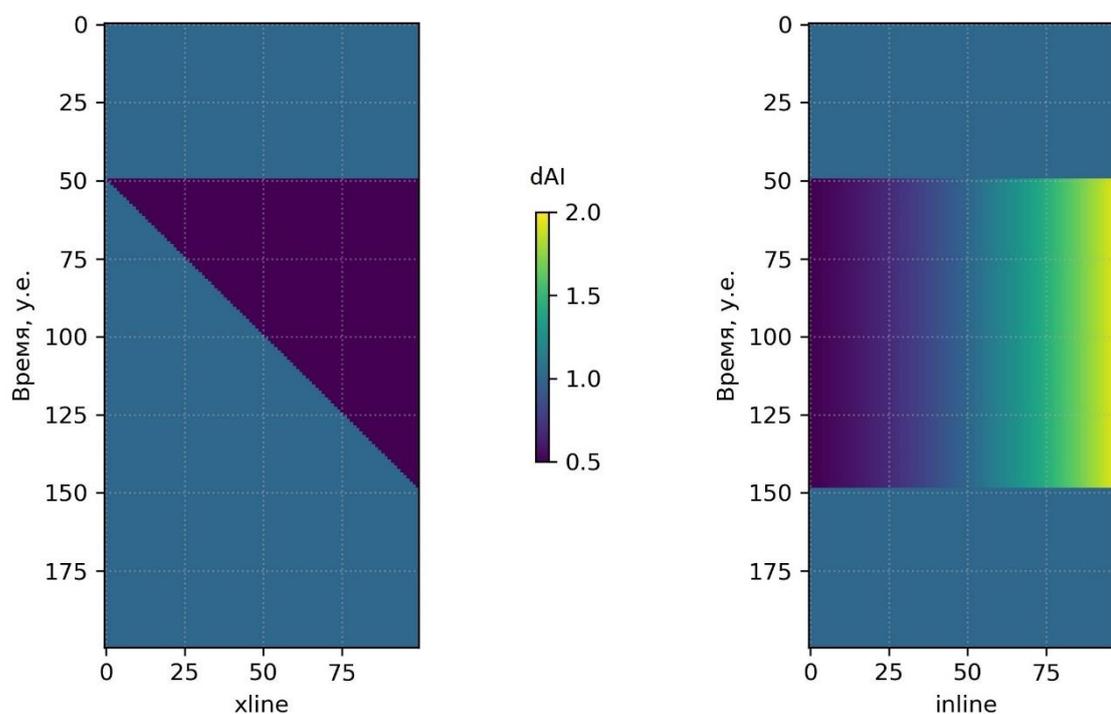


Рисунок 10 Трехмерная модель клина с переменной акустической жесткостью

После создания модели были рассчитаны коэффициенты отражения и построен куб коэффициентов отражения (рис. 11).

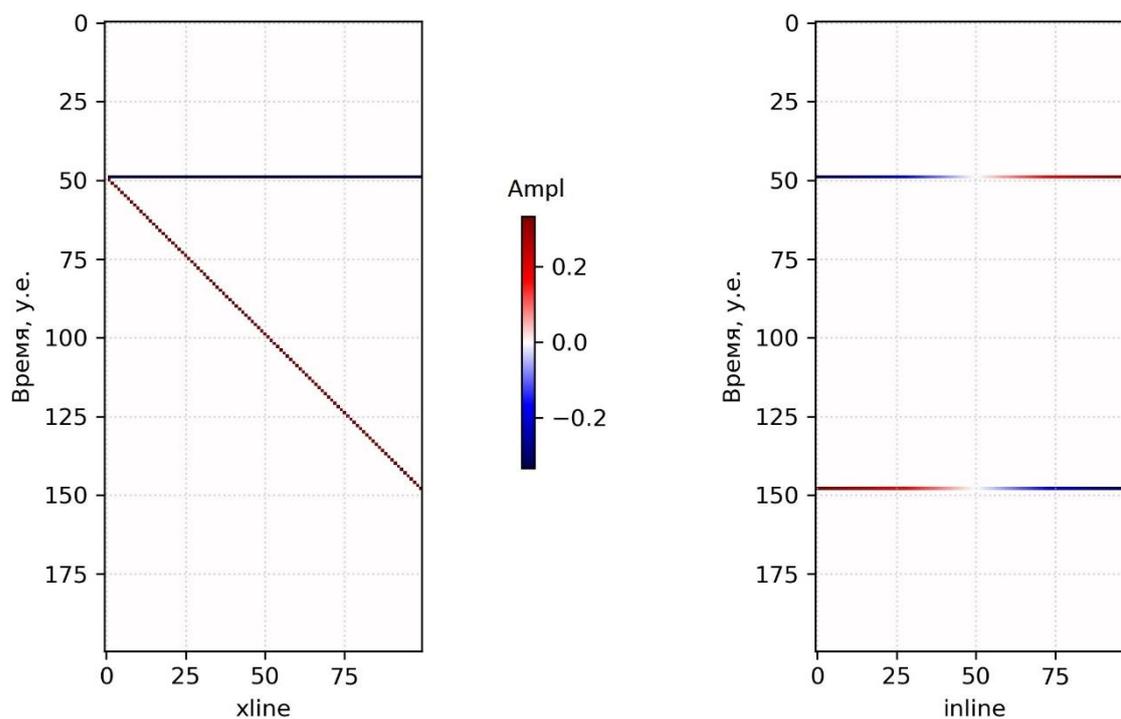


Рисунок 11 Куб коэффициентов отражения

В качестве исходного импульса для моделирования синтетического волнового поля использовался сигнал Риккера, который имел доминантную частоту в 30 Гц.

Создание синтетического волнового поля (рис. 12) выполнялось с вертикальным распространением волны, пренебрегая процессами образования на границах обменных и кратных волн. Это исключение позволяет предположить, что волновое поле состоит лишь из однократно отраженных волн. В дальнейшем полученное синтетическое волновое поле использовалось для анализа алгоритма спектральной инверсии.

С этой целью автором была выполнена обработка синтетического волнового поля по алгоритмам вейвлет-преобразования и спектральной инверсии.

Для оценки работоспособности алгоритма спектральной инверсии выполнялось следующее:

- Сопоставление амплитудных графиков и спектров вейвлет-преобразования (CWT) и спектральной инверсии (OMP);
- Анализ информативности разрезов цветового смешивания (RGB) для двух спектров (CWT и OMP).

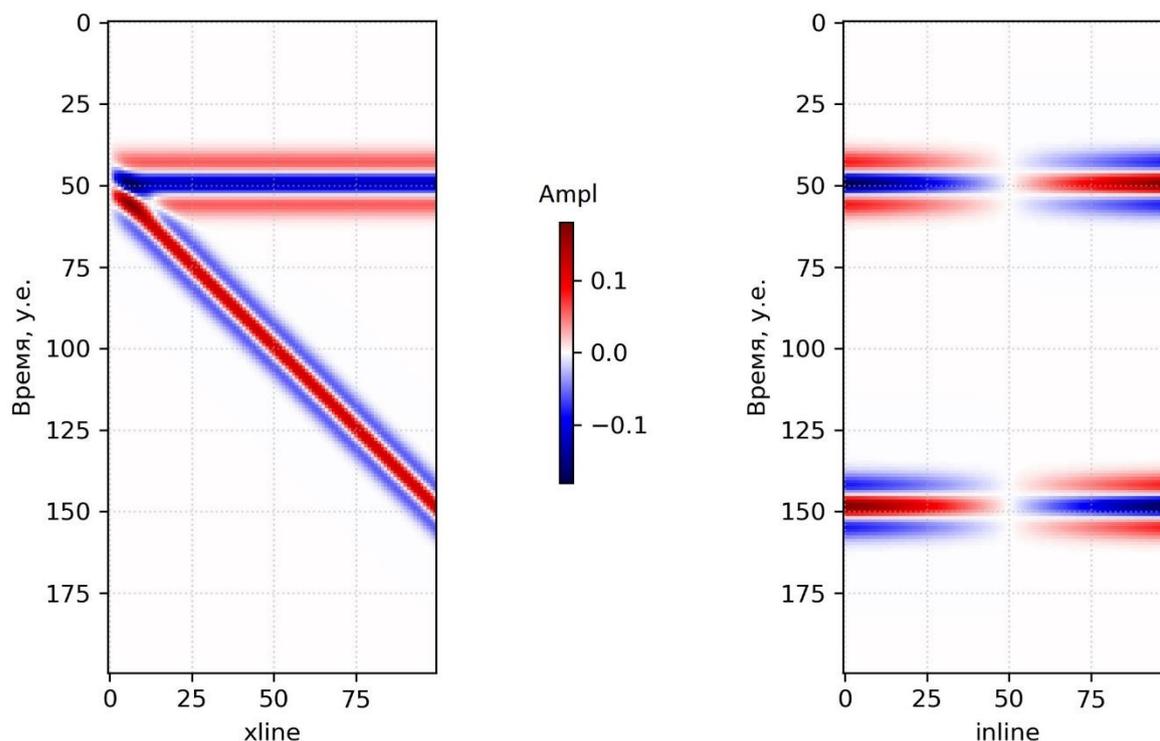


Рисунок 12 Волновое поле трехмерной модели

2.2 Сопоставление амплитудных графиков и спектров вейвлет-преобразования и спектральной инверсии

Исходя из алгоритма спектральной инверсии, который был описан ранее, основной задачей является аппроксимация входной трассы серией коэффициентов отражений, отвечающих вейвлетам из заданного словаря. Пересчет отдельных вейвлетов в частотную область и последующее суммирование позволяет получить детальный спектр входной трассы. Таким образом, в качестве результата алгоритма были рассмотрены два массива данных – коэффициенты отражения (аппроксимации) и частотно-временной спектр для каждой входной трассы.

Частотно-временной спектр сейсмической трассы представляет собой распределение амплитуд по частоте и времени для каждой входной трассы. Данный двумерный массив может быть использован для формирования кубов амплитудных характеристик отдельных частот – путем выбора одной трассы амплитуд, отвечающей выбранному значению частоты. В этом случае результаты спектральной инверсии по типу выходной информации не будут отличаться от стандартных алгоритмов спектральной декомпозиции.

Дальнейшее использование, полученной амплитудной характеристики, возможно в нескольких алгоритмах – в качестве отдельного атрибута, отражающего изменения амплитудной характеристики полученного спектра, и в качестве компоненты RGB-визуализации.

Первым этапом анализа результатов спектральной инверсии являлось сопоставление амплитудных графиков для нескольких наборов гармоник вдоль кровли выклинивающегося пласта с результатами вейвлет-преобразования.

Для анализа вариаций амплитуд отдельных гармоник в кровельной части клина были выбраны графики разных наборов гармоник (рис.13-15):

- 5, 15, 25 Гц;
- 10, 20, 30 Гц;
- 15, 25, 35 Гц.

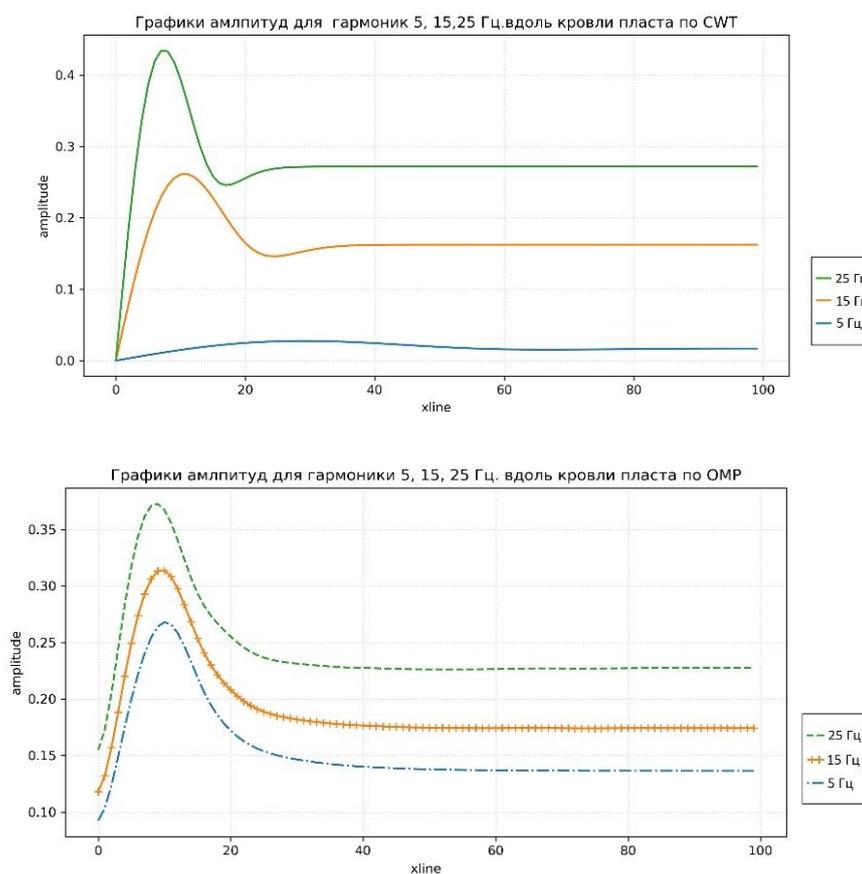


Рисунок 13 Графики амплитуд для гармоник 5,15,25 Гц вдоль кровли пласта, построенные с помощью вейвлет-преобразования (наверху) и спектральной инверсии (внизу)

Анализируя графики амплитуд, построенные с помощью вейвлет-преобразования вдоль кровли пласта для набора частот 5, 15, 25 Гц (см. рис. 13, наверху),

было установлено, что интерференция отраженных волн от кровли и подошвы выклинивающегося пласта влияет на характер изменения амплитуд гармоник.

Для гармоники 5 Гц наблюдаются минимальные значения амплитуд, но небольшое увеличение амплитуд наблюдается по мере уменьшения временной мощности. Для гармоники 15 Гц амплитудные аномалии более локализованы в области минимальной временной мощности. Для гармоники 25 Гц значения амплитуд максимально локализованы.

На графиках, построенных с помощью вейвлет-преобразования для набора частот 10, 20, 30 Гц (см. рис. 14, наверху), наблюдаются более локализованные амплитудные аномалии, по сравнению с предыдущим набором частот, что говорит о большей разрешающей способности более высокочастотного сигнала.

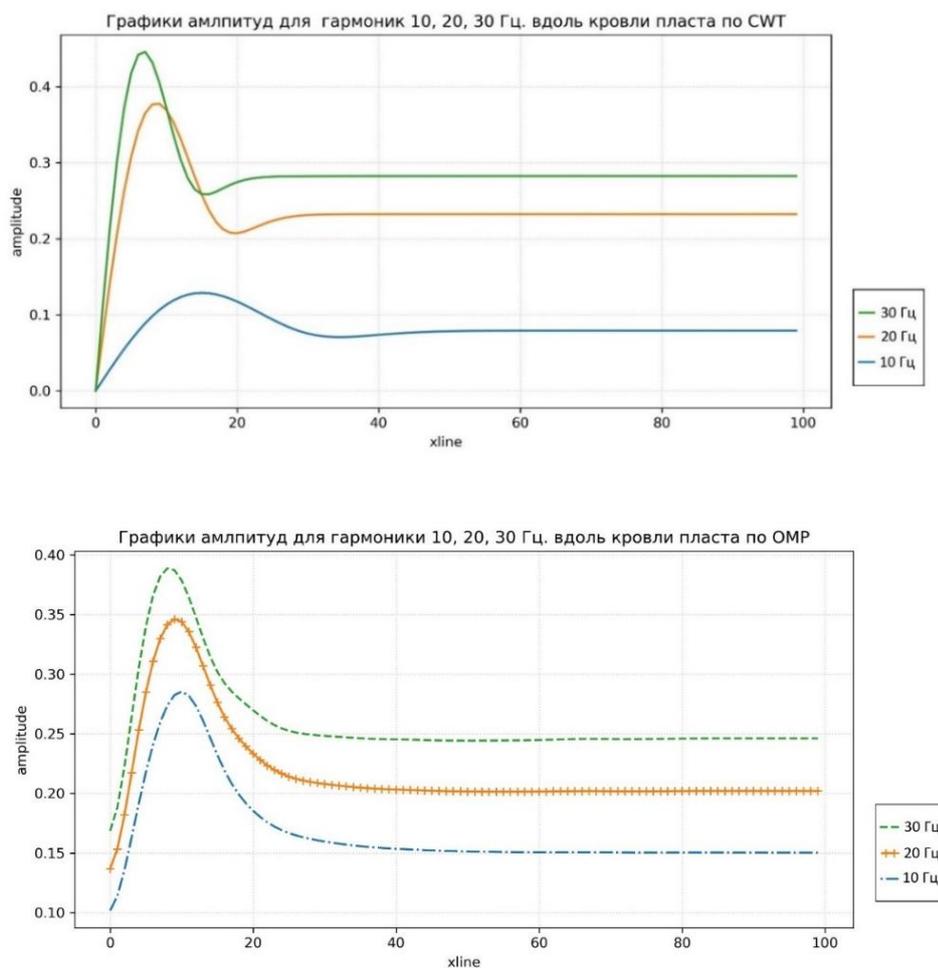


Рисунок 14 Графики амплитуд для гармоник 10, 20, 30 Гц вдоль кровли выклинивающегося пласта, построенные с помощью вейвлет-преобразования (наверху) и спектральной инверсии (внизу)

На графике амплитудных характеристик гармоник по кровле клина наблюдается зависимость средней амплитуды графика от частоты гармоники, данный факт объясняется неравномерным распределением амплитуд в вейвлете Риккера. Максимальной амплитудой характеризуется доминантное значение гармоники – 30 Гц, которое было использовано при моделировании.

Для набора 15, 25, 35 Гц (см. рис. 15, наверху) графики ведут себя аналогично вышерассмотренному набору, но с большей локализацией амплитуд.

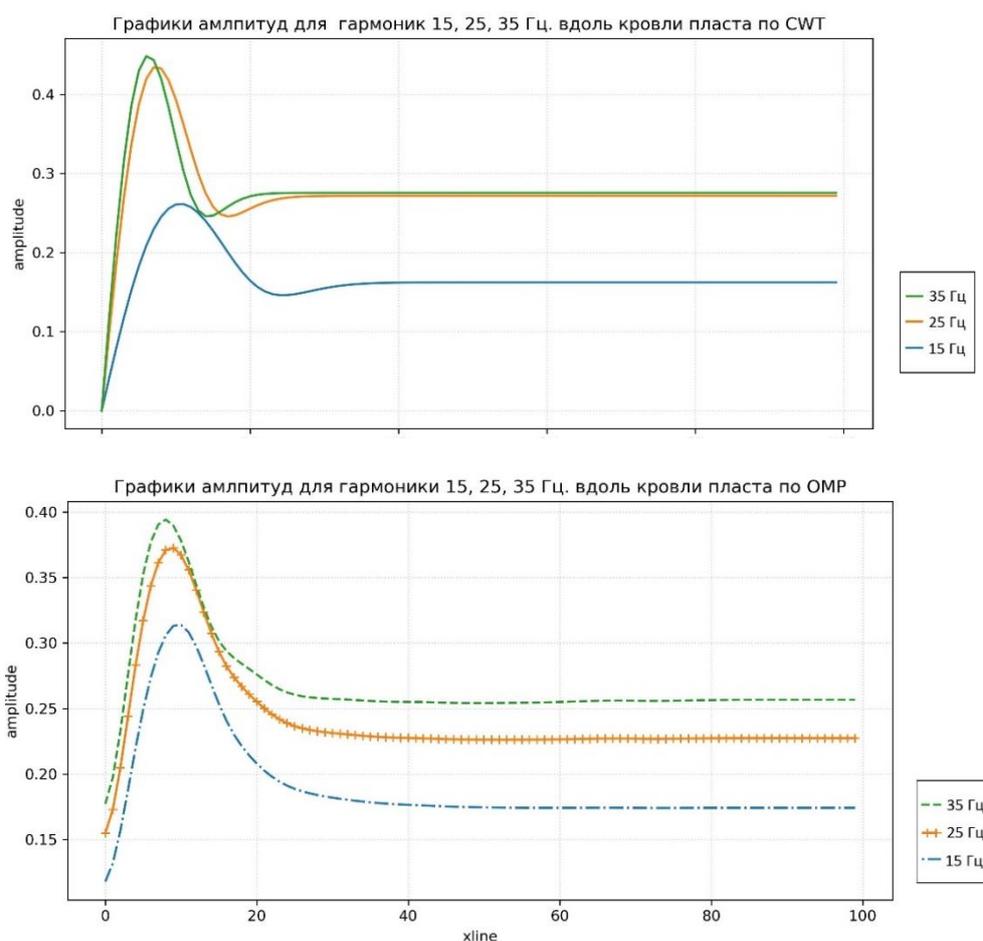


Рисунок 15 Графики амплитуд для гармоник 15, 25, 35 Гц вдоль кровли клина, построенные с помощью вейвлет-преобразования (наверху) и спектральной инверсии (внизу)

Графики амплитуд, построенные на основе *спектральной инверсии* (см. рис. 13-15, внизу), обладают более локализованными аномалиями, экстремальные значения амплитуд для всех частотных наборов приурочены к точке выклинивания. Вне зависимости от частоты гармоники амплитудные графики ведут себя идентично и отличаются лишь относительными значениями амплитуд, что связано

с доминантной частотой сигнала, использованного для моделирования волнового поля. В результате можно отметить, что явление интерференции от кровли и подошвы выклинивающего пласта не влияет на результаты спектральной инверсии.

Вторым этапом анализа алгоритма спектральной инверсии было построение амплитудно-частотных срезов и сравнение их с результатами вейвлет-преобразования.

В качестве анализируемого набора были выбраны срезы куба для частот 10 Гц, 30 Гц (рис.16-17).

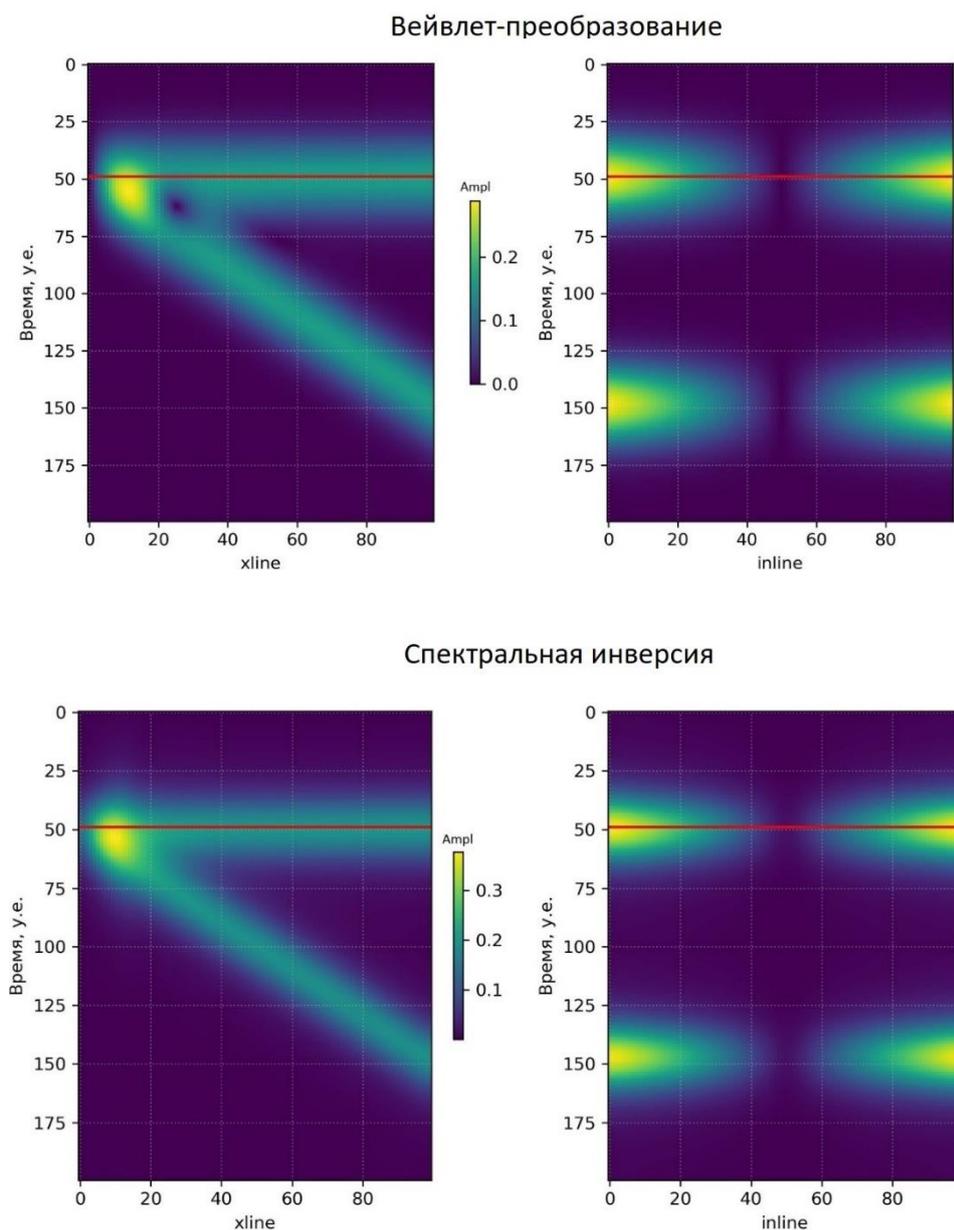
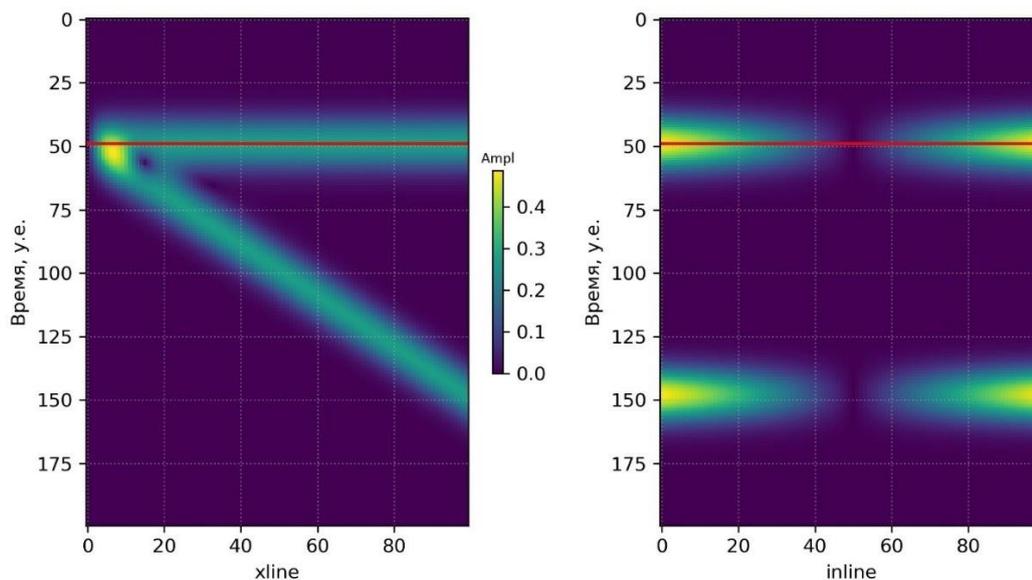


Рисунок 16 Амплитудные срезы для частоты 10 Гц, полученные по вейвлет-преобразованию (наверху) и спектральной инверсии (внизу)

Вейвлет-преобразование



Спектральная инверсия

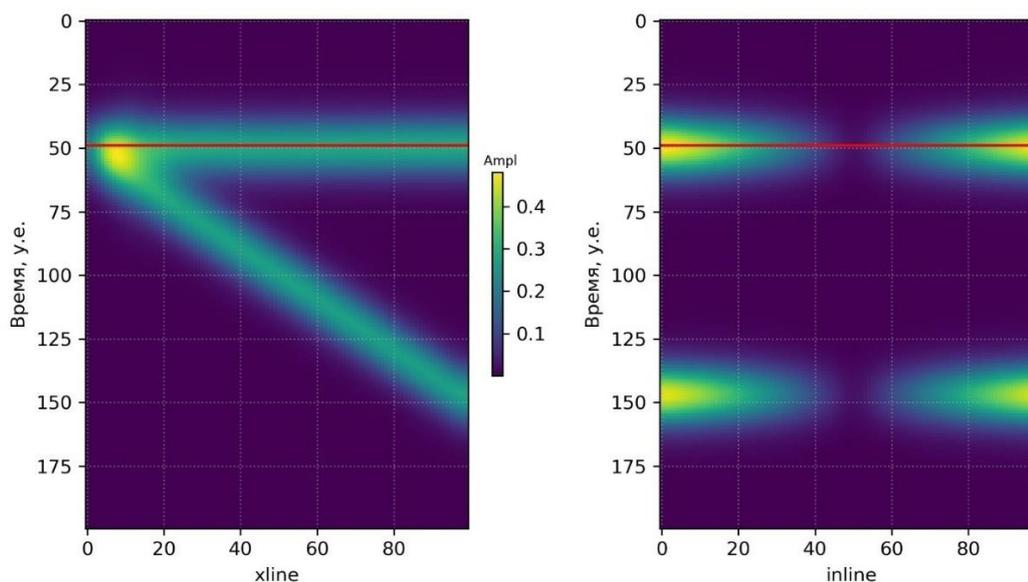


Рисунок 17 Амплитудные срезы для частоты 30 Гц, полученные по вейвлет-преобразованию (наверху) и спектральной инверсии (внизу)

В результате анализа амплитудно-частотных срезов для гармоники 10 Гц (см. рис. 16) по синтетической модели для вейвлет-преобразования и спектральной инверсии, подтверждается факт отсутствия влияния интерференции на результаты спектральной декомпозиции по алгоритму спектральной инверсии. В области малой временной мощности на результатах вейвлет-преобразования наблюдается зона «размыва» границ, в то время как результаты спектральной инверсии позволяют разделить границы рефрактора в этой области.

На амплитудных срезах для частоты 30 Гц (см. рис. 17) различий практически не наблюдается, это можно объяснить более высокой разрешающей способностью. Однако на срезе, построенному с помощью вейвлет-преобразования, все же наблюдается интерферирующая часть в области минимальной временной мощности. Таким образом, для выбранной модели, стандартный подход к спектральному анализу позволяет установить, что **алгоритм спектральной инверсии лучше локализует области спектральных аномалий, и позволяет детальнее выделить границы рефлекторов в области малой временной мощности.**

2.3 Анализ информативности разрезов цветового смешивания (RGB)

Для анализа информативности разрезов цветового смешивания, полученных по данным спектральной инверсии, были выбраны характерные срезы, имитирующие следующие модели:

- Модель выклинивающегося пласта с акустической жесткостью большей, чем во вмещающей среде;
- Модель выклинивающегося пласта с акустической жесткостью меньшей, чем во вмещающей среде;

На вход цветových каналов подавалось 3 гармоники – 10 Гц для красного цветového канала (R), 20 Гц для зеленого (G) и 30 Гц для синего цветového канала (B).

1. Модель выклинивающегося пласта с акустической жесткостью большей, чем во вмещающей среде (рис.18).

Сравнение разрезов цветового смешивания для модели выклинивающегося пласта с акустической жесткостью большей, чем во вмещающей среде представлено на рисунке 18.

В обоих случаях на разрезе цветового комбинирования в области толщин, где отсутствует интерференция волн, наблюдается серая окраска рефлектора, что отражает одинаковое распределение амплитуд по гармоникам.

На RGB разрезе, полученном по алгоритму вейвлет-преобразования, изменение характера цветового смешивания наблюдается при уменьшении толщины клина и наступает до проявления видимой интерференции отражений от кровли и подошвы пласта в волновом поле. Характер смены цветových аномалий соответствует постепенному затуханию амплитуд гармоник в зависимости от их частоты. Низкочастотные гармоники, за счет большей длины волны, раньше подвергаются воздействию эффекта интерференции, что приводит к формированию аномалии

красного цвета в мощной части клина. С уменьшением мощности цвет аномалии изменяется к зеленому и сине-фиолетовому оттенку, отражая преобладание высоких частот. В области точки выклинивания образуется яркая («белая») аномалия, отвечающая экстремальным значениям по всем спектральным каналам.

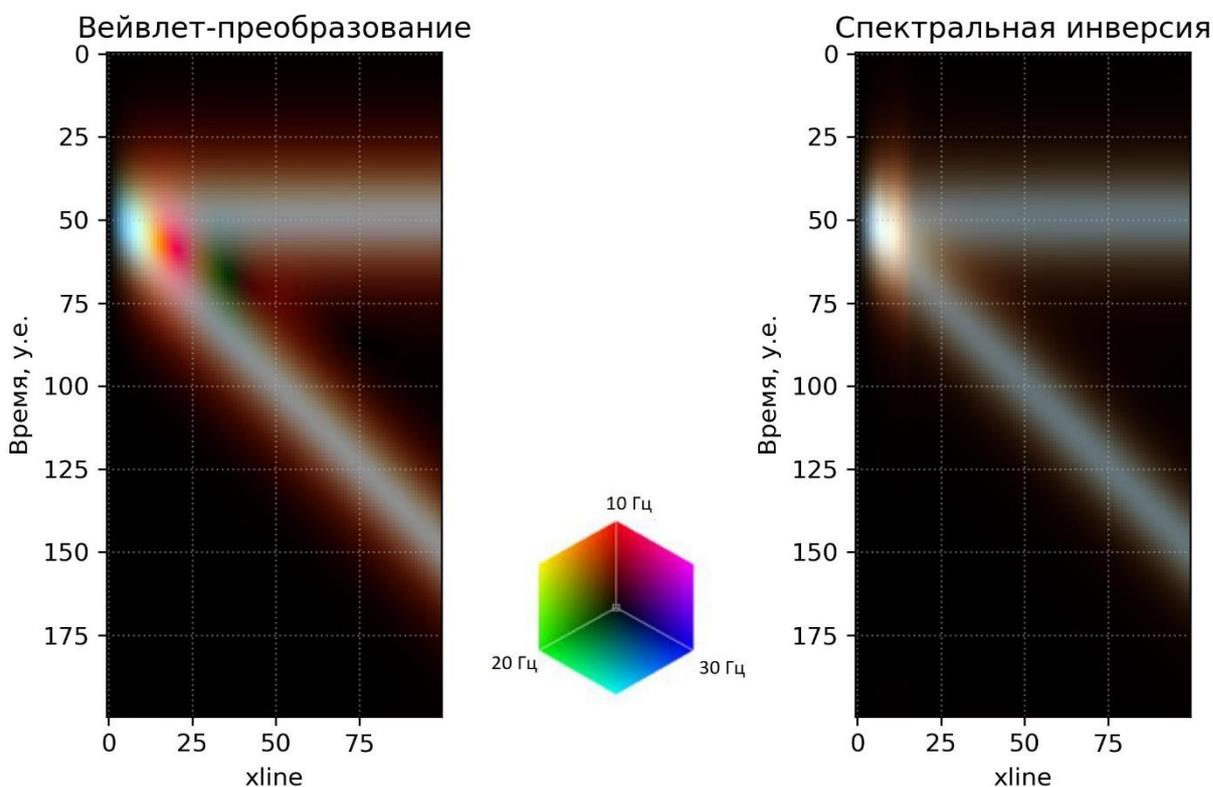


Рисунок 18 Разрезы RGB смешивания для пласта с акустической жесткостью большей, чем во вмещающей среде, полученные в результате применения вейвлет-преобразования (слева) и спектральной инверсии (справа)

Анализируя RGB разрез, полученный по алгоритму спектральной инверсии, стоит отметить, что, в отличие от вейвлет-преобразования, здесь отсутствует обширная область цветовых аномалий. Амплитудные аномалии зафиксированы лишь в точке выклинивания.

2. *Модель выклинивающегося пласта с меньшей акустической жесткостью, чем во вмещающей среде (рис.19).*

Сравнивая RGB разрезы для данного среза можно отметить, что, в целом, характер аномалий как для вейвлет-преобразования, так и для спектральной инверсии остаются аналогичны тем, которые были рассмотрены в предыдущем случае. Однако в случае с RGB данными для вейвлет-преобразования появление аномалий цветового смешивания наступает при меньшей временной мощности пласта. Этот эффект связан с

малой скоростью распространения упругих волн внутри такого пласта, что приводит к меньшей длине волны, за счет чего эффект интерференции волн наступает при меньшей временной мощности.

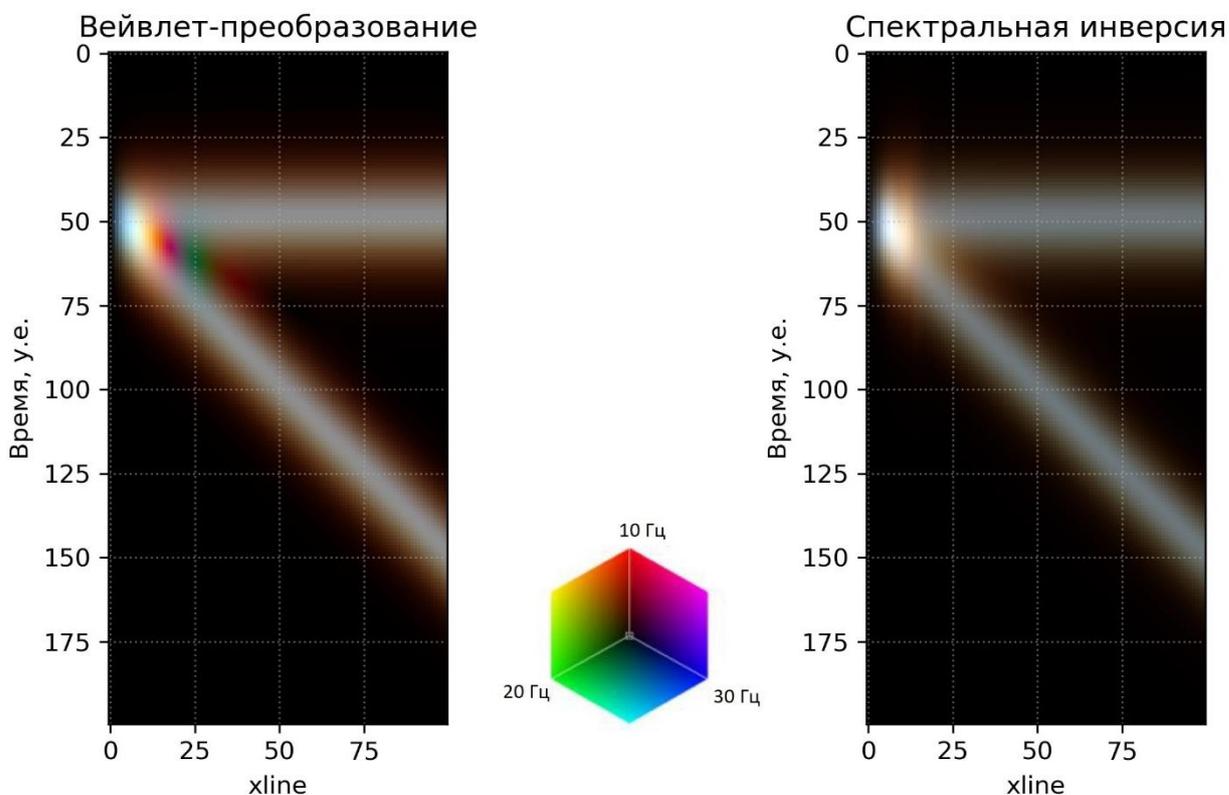


Рисунок 19 Разрезы RGB смешивания для пласта с меньшей акустической жесткостью, чем во вмещающей среде, полученные в результате вейвлет-преобразования (слева) и спектральной инверсии (справа)

Разрезы цветового комбинирования для спектральной инверсии показывают такой же результат, как и в случае с предыдущим срезом.

По приведенным выше данным следует сделать вывод, что **результаты спектральной инверсии дают менее информативный результат с точки зрения цветовой дифференциации выклинивающегося пласта.** Это связано с отсутствием влияния интерференции отражений от кровли и подошвы клина на результаты анализа спектра. Поэтому **применение RGB-визуализации результатов спектральной инверсии является нецелесообразным,** в результате чего возникает вопрос о других возможностях использования данного метода спектральной декомпозиции, и, в частности, об использовании коэффициентов отражения (аппроксимации) для повышения разрешающей способности волнового поля.

2.4 Использование коэффициентов отражения для повышения разрешающей способности волнового поля

Смоделированное волновое поле подавалось на вход алгоритма спектральной инверсии для решения обратной задачи, которая заключалась в восстановлении коэффициентов отражения по имеющимся модельным сейсмическим трассам. На выходе алгоритма получен куб коэффициентов отражения, который впоследствии сравнивался с априорным кубом (рис. 20).

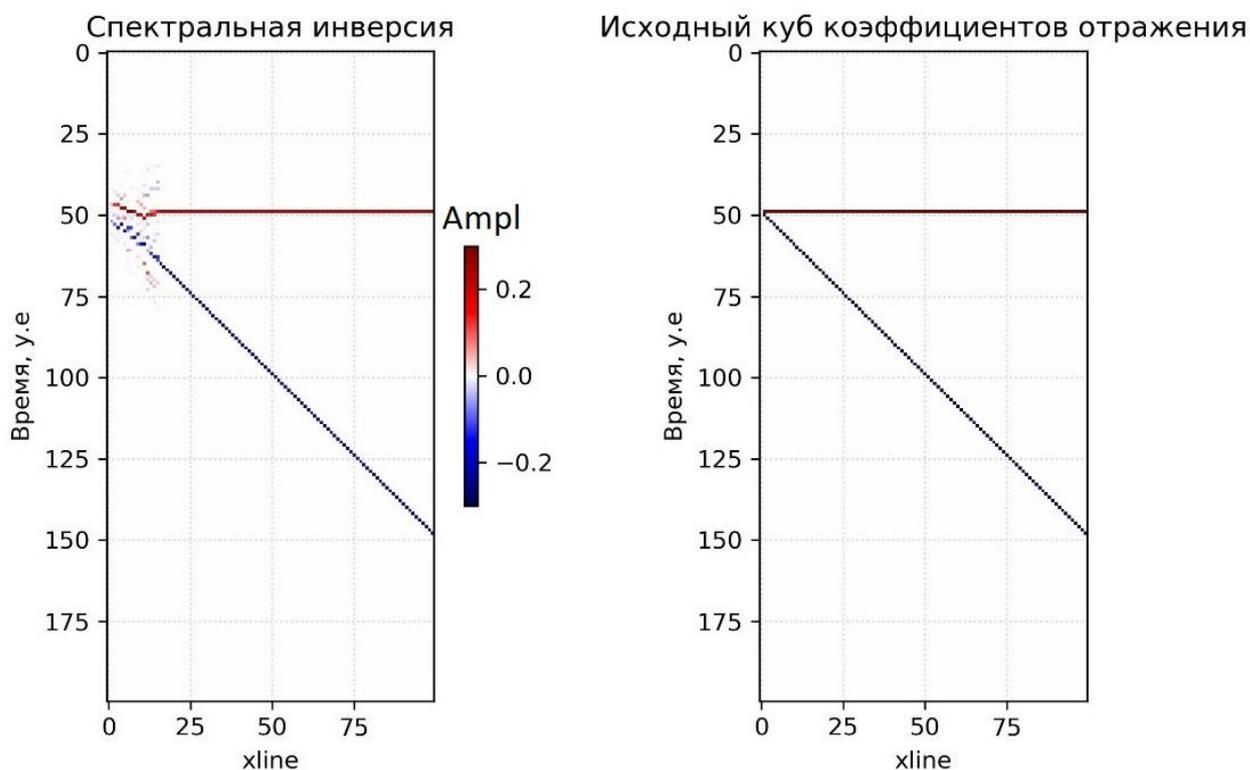


Рисунок 20 Разрез куба коэффициентов отражения, полученный с помощью спектральной инверсии (слева) и разрез априорного куба коэффициентов отражения (справа)

Сравнение разрезов коэффициентов отражения (см.рис.20) позволяет установить **высокую степень подобия между коэффициентами, восстановленными по сейсмической трассе с применением алгоритма спектральной инверсии, и исходными коэффициентами, которые были заложены в модель.**

На исходном волновом поле различить границы рефлекторов становится невозможным, уже начиная с inline 20 (здесь наблюдается точка выклинивания), а **по коэффициентам отражения (аппроксимации), полученным по спектральной**

инверсии, можно проследить границы рефлекторов вплоть до их полного выклинивания, несмотря на ограничения, проявленные в виде неоднозначной работы алгоритма и нарушения сплошности границ (рис.21).

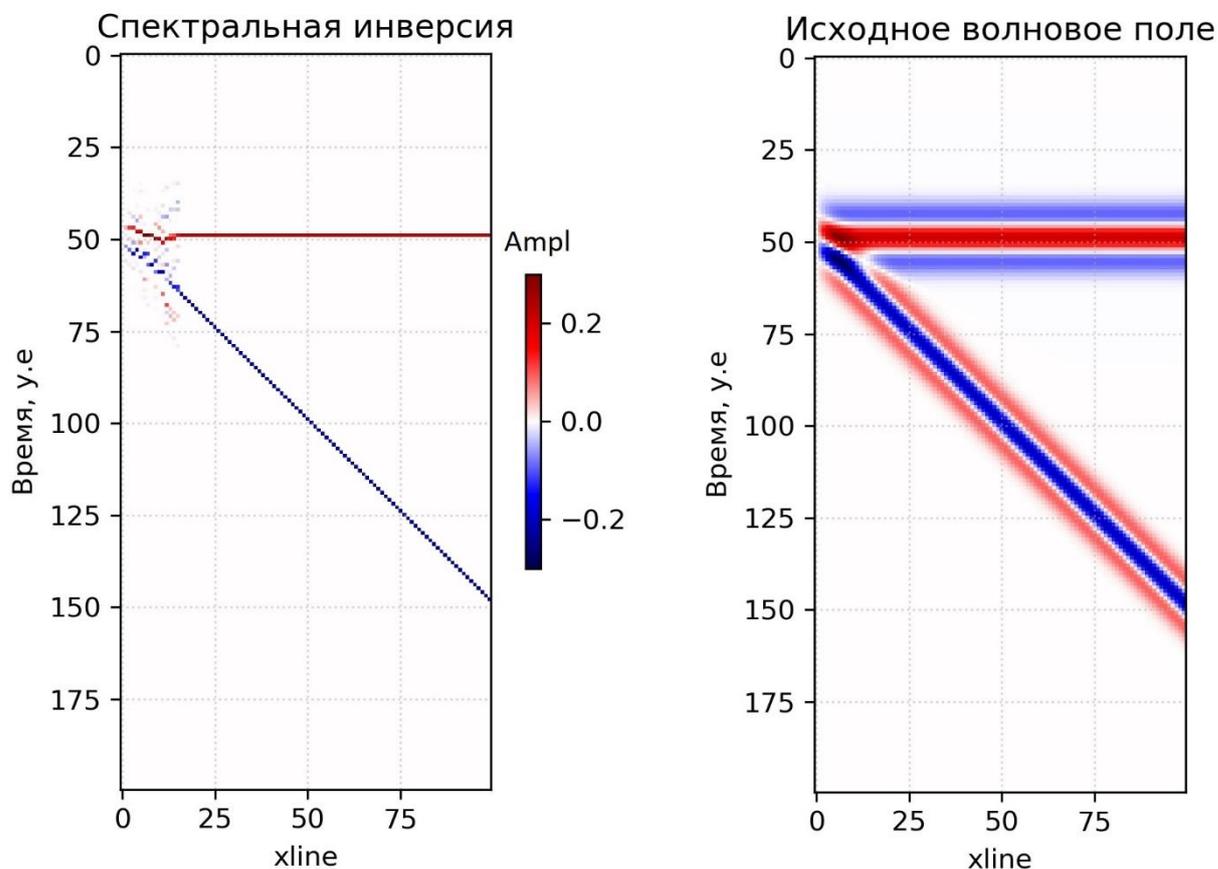


Рисунок 21 Разрез куба коэффициентов отражения, полученный с помощью спектральной инверсии (слева) и Разрез исходного волнового поля (справа)

Данные, полученные по спектральной инверсии, позволяют существенно увеличить разрешающую способность волнового поля за счет уменьшения вклада интерференции, а также использования коэффициентов отражения (аппроксимации). Таким образом, спектральная инверсия позволяет определить границы рефлекторов в области минимальной временной мощности, а также получить новую информацию для сейсмогеологического моделирования.

3 ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА СПЕКТРАЛЬНОЙ ИНВЕРСИИ НА РЕАЛЬНЫХ ДАННЫХ

В качестве реальных сейсмических данных для применения алгоритма спектральной инверсии были использованы материалы сейсморазведочных работ по одному из месторождений, которое находится на территории Нефтеюганского района Ханты-Мансийского автономного округа.

3.1 Геологическое описание района исследования

3.1.1 Литолого-стратиграфическая характеристика

Литолого-стратиграфический разрез в районе месторождения подразделяется на два структурно-формационных этажа: доюрское складчатое образование и мезозойско-кайнозойский чехол.

Доюрские образования

Отложения доюрского основания (фундамента) не вскрыты. По данным бурения доюрские породы (вскрытые скважинами на соседних площадях) характеризуются весьма пестрым вещественным составом: кварцевыми порфиритами, известняками, метаморфизованными аргиллитами и мергелями. Коры выветривания развиты над эффузивами, условно триасового возраста.

К кровле доюрского основания приурочен опорный отражающий горизонт FUND.

Доюрские образования с угловым стратиграфическим несогласием перекрываются песчано-глинистыми породами юрской системы.

Юрская система

В составе юрских отложений выделяются осадки всех трех отделов: нижнего, среднего и верхнего.

Нижний отдел

Нижнеюрские отложения представлены горелой свитой (плинсбах-ранний аален). Стратиграфически свита состоит из базального пласта, перекрытого черносланцевой тогурской пачкой, выше которой залегают песчано-глинистые отложения, в свою очередь, перекрытого аналогичной черносланцевой радомской пачкой. Песчаные пласты горелой свиты образовывались в условиях мелководного моря

за счет местных источников сноса и общебассейнового перераспределения псаммитового материала. Обогащенные органикой глинистые илы будущих черносланцевых глин накапливались в периоды эвстатического повышения уровня моря в условиях ограниченного привноса органического материала.

Средний отдел

Отложения средней юры выделяются в тюменскую свиту (аален-байос-батранний келловей), накапливавшуюся в условиях аллювиальных, озерных и озерно-болотных фаций. Свита представлена чередованием аргиллитов, алевролитов и песчаников с прослоями углей. Аргиллиты серые до темно-серых, алевролитистые, слюдистые, углистые. Алевролиты серые, часто карбонатизированные. Песчаники серые, мелкозернистые, глинистые. Породы содержат обугленные растительные остатки, встречаются прослойки углей. Песчаные и глинистые пласты не выдержаны по простиранию и часто замещают друг друга. К кровле тюменской свиты приурочен песчаный пласт (несогласно перекрывается породами абалакской свиты). Толщина тюменской свиты составляет 300-330 м.

К кровле тюменской свиты, приурочен опорный ОГ Т.

Верхний отдел

Отложения верхней юры представлены аргиллитами абалакской свиты и битуминозными аргиллитами баженовской свиты.

Абалакская свита (келловей-оксфорд-киммеридж) формировалась в условиях максимума келловейско-киммериджской трансгрессии моря, сложена аргиллитами темно-серыми до черных, тонкоотмученными, с большим содержанием органики, участками с прослойками песчаного материала и вкраплениями пирита. В верхней ее части содержатся стяжения глауконита и фауна, встречаются прослойки глинистых трещиноватых и кавернозных известняков. Возможные залежи литологически экранированные, нефтеносность не контролируется структурным планом. Толщина абалакской свиты 20-35 м.

Баженовская свита (титон (волжский) – берриас) залегает в кровельной части верхнеюрского комплекса, перекрывает отложения абалакской свиты. Отложения свиты представлены битуминозными, темно-серыми до черного аргиллитами, часто с буроватым оттенком, ближе к основанию глинами слабобитуминозными, кремнистыми и известковистыми.

Баженовская свита является наиболее выдержанным по разрезу и в плане стратиграфическим подразделением осадочного чехла Западно-Сибирской плиты. Помимо выдержанности, развития битуминозных и листоватых глин, особенностями

отложений баженовской свиты являются наличие аномально высоких пластовых давлений и температур, высокое содержание рассеянного органического вещества, преобладание в составе монтмориллонитовых образований. Однако на многих площадях Сургутского и Салымского нефтегазоносного района «нормальный» характер залегания баженовской свиты нарушается «внедрением» песчано-алевритовых толщ, сходных по облику, литологическому составу и текстурным особенностям с песчано-алевритовыми породами ачимовской толщи. Более того, имеются палеонтологические доказательства их одновозрастности (Северо-Конитлорское месторождение). На большей части территории Западно-Сибирской плиты она отождествляется с опорным ОГ BZNV.

Толщина баженовской свиты в нормальном залегании от 30-55 м до 100 и более м.

Меловая система

Меловые отложения ограничены в подошве битуминозными аргиллитами баженовской, в кровле – пластичными глинами ганькинской свит. Согласно современным представлениям неоконские отложения формировались в результате бокового недокомпенсированного заполнения осадочного бассейна. Привнос осадков осуществлялся с востока через континентальную аккумулятивную равнину. Основная часть принесенных песчано-алевритовых осадков накапливалась на прибрежно-морском аккумулятивном шельфе, формируя покровные песчаные пласты, большая же часть алевритоглинистых осадков отлагалась на аккумулятивном склоне, избытки песчаного материала сбрасывались с аккумулятивного шельфа к основанию седиментационного склона, формируя линзовидные песчаники ачимовской толщи.

Ахская свита (берриасс – ранний готерив) является возрастным аналогом сортымской и усть-балыкской свит Сургутского района, согласно залегает на баженовской свите и перекрывается в кровле черкашинской свитой. В целом ахская свита стратиграфически подразделяется на нижнюю и верхнюю подсвиты. В основании ахской свиты залегает подачимовская пачка (20 м), представленная морскими темно-серыми плотными глинами. Выше залегают ачимовские аналоги сортымской свиты Сургутского района (берриасс-валанжин) – клиноформные, линзовидные пласты, возрастные аналоги горизонта. Мощность ачимовской толщи изменяется в интервале 82-137 м. Верхняя подсвита, сложена прибрежно-морскими и мелководными осадками, состоящими из темно-серых пород, грубозернистость которых возрастает вверх по разрезу. В кровле ахской свиты выделяется 25-40-метровая пачка темно-серых аргиллитов и глин, именуемая как «пимская». Толщина ахской свиты до 630 м.

Черкашинская свита (верхняя часть раннего готерива – баррем) согласно залегает на породах ахской свиты и перекрывается отложениями алымской свиты. Сложена частым и неравномерным переслаиванием серых песчаников, алевролитов (пласты группы АС) и глин линзовидноволнистых. Глины аргиллитоподобные, темно-серые, иногда зеленовато-серые, тонкоотмученные. На площади месторождения пласты АС10, АС11 являются промышленно нефтеносными. Продуктивные пласты перекрываются региональной глинистой приобской пачкой. Толщина свиты составляет 210-238 м и увеличивается в западном направлении. Породы черкашинской свиты образовались в морских условиях, которые постепенно сменялись речными. Осадки заполняли бухты и заливы, а затем наступил период континентального отложения осадков в условиях размывания дельтовой равнины. Различные условия осадконакопления подтверждаются фауной и флорой.

Алымская свита (ранний апт) подразделяется на нижнюю и верхнюю подсвиты. Свита залегает на отложениях черкашинской свиты и согласно перекрывается викуловской свитой. Отложения представлены аргиллитоподобными глинами, иногда слабобитуминозными, с прослоями алевролитов, редко серых песчаников с маломощными прослоями глинистых известняков. В низах верхней подсвиты залегает пачка регионально-выдержанных низкоомных глин, в геологической практике обычно именуемая кошайской пачкой. Эта пачка является ярким каротажным и сейсмическим маркером. К ее подошве привязан ОГ М. Толщина алымской свиты 120-133 м.

Викюловская свита подразделяется на две подсвиты: нижнюю преимущественно глинистую и верхнюю – песчано-глинистую, с преобладанием песчаников и алевролитов.

Нижняя подсвита сложена глинами серыми и темно-серыми, слюдистыми, алевролитистыми, с тонкой горизонтальной слоистостью, которая хорошо видна по угольному тонкому детриту.

Верхняя подсвита представлена серыми и светло-серыми алевролитами, уплотненными песками и песчаниками, от тонко- до среднезернистых, слюдистых, с глинистым цементом, с прослоями серых алевролитовых глин и глинистых известняков. Отмечается растительный детрит, сидерит, в кровле породы слабо каолинизированы, встречаются единичные фораминиферы. Толщина свиты на изучаемом месторождении изменяется от 225 до 240 м, увеличиваясь в восточном и северо-восточном направлениях. Возраст викуловской свиты датируется как верхнеаптский.

Ханты-Мансийская свита представлена неравномерным переслаиванием песчано-алевролитовых и глинистых пород. Является аналогом средней части покурской

свиты Сургутского района. Глины аргиллитоподобные, темно-серые, преимущественно тонкоотмученные, с редкими прослоями алевроитов, глинистых известняков и сидеритов. Алевроиты серые, с прослоями темно-серых алевроитовых глин. Верхняя часть разреза свиты опесчанена, мощность отдельных пластов достигает 5-8 м. В породах встречается растительный детрит, пиритизированные водоросли, остатки рыб, двустворки, аммониты. Толщина свиты составляет 260-275 м. Возраст свиты датируется альбским временем.

Уватская свита (сеноман) представлена алевроитами, уплотненными песками, мелкозернистыми, светло-серыми с прослоями карбонатных разностей в верхней части свиты, с маломощными прослоями глин серых, буровато-серых, алевроитистых и глинистых известняков в нижней части свиты. В кровельной части свиты пески и слабосцементированные песчаники. Изредка встречается пирит, сидерит, ожелезнение, растительный аттит, фораминиферы. Толщина свиты на месторождении изменяется от 285 до 296 м, закономерно увеличиваясь в восточном направлении. К кровле уватской свиты приурочен ОГ UVAT.

Кузнецовская свита (турон – ранний коньяк) согласно перекрывается березовской свитой. Сложена свита темно-серыми, алевроитистыми глинами, с единичными прослоями алевролитов. Толщина свиты 45-55 м.

Березовская свита (коньяк – сантон – кампан) согласно перекрывается ганькинской свитой. Литологически подразделяется на две подсвиты. Нижняя подсвита сложена преимущественно опоками и глинами опокovidными, с редкими прослоями алевролитов. Верхняя подсвита представлена глинами серыми и серовато-зелеными, слабоалевроитистыми, участками опокovidными, с глауконитом. Толщина березовской свиты 135-170 м.

Ганькинская свита (маастрихт – дат) завершает разрез отложений меловой системы, с несогласием перекрывается талицкой свитой. Сложена глинами желтовато- и зеленовато-серыми, с редкими зернами глауконита и конкрециями сидерита. Толщина свиты 54-103 м.

Палеогеновая система

В составе палеогеновой системы выделяются талицкая, люлинворская, тавдинская, атлымская, новомихайловская и туртасская свиты.

Талицкая свита (палеоцен) подразделяется на две подсвиты. Нижняя представлена глинами темно-серыми, иногда с буроватым оттенком, алевроитистыми, аргиллитоподобными. Верхняя подсвита сложена глинами темно-серыми с мелкими

линзами алевролитов. Встречаются пиритизированные растительные остатки, чешуйки рыб, комплекс фораминифер. Толщина свиты 120-138 м.

Люлинворская свита (поздний палеоцен – эоцен) подразделяется на три подсвиты.

Нижняя подсвита сложена глинами опоковидными и опоками темно-серыми. Средняя подсвита представлена, в основном, глинами с прослоями диатомитов и диатомовых глин. Глины серые, с зеленоватым оттенком, плотные, опоковидные, алевроитовые, с неотчетливой слоистостью. Верхняя подсвита сложена зеленовато – и желтовато-серыми алевроитистыми глинами, с глауконитом, с прослоями опок. Редко встречаются обрывки растений. Толщина свиты 215-250 м.

Тавдинская свита (поздний эоцен) сложена глинами зеленовато-серыми, алевроитистыми, с прослоями алевроитов. Толщина свиты 160-180 м.

Атлымская свита (ранний олигоцен) сложена песками светло-серыми, кварцевыми, мелко – тонкозернистыми, с прослоями зеленовато-серых глин, алевроитов. Толщина свиты 50-60 м.

Новомихайловская свита (олигоцен) включает в себя глины серые, коричневатосерые, алевролиты, пески кварцевые, с прослоями бурых углей. Толщина свиты около 80 м.

Туртасская свита (поздний олигоцен) завершает разрез палеогена. Сложена глинами, алевроитами с прослоями диатомитов и кварцево-глауконитовых песков. Толщина свиты 40-70 м. Неогеновые отложения в пределах участка отсутствуют.

Четвертичные отложения

Четвертичные отложения со стратиграфическим несогласием залегают на размывтой поверхности континентальных отложений палеогена. Для них характерны аллювиальные и озерно-аллювиальные пески, глины, супеси и суглинки. В нижней части присутствуют грубозернистые пески с включениями гравия, гальки, реже валунов. Толщина осадков 90-100 м.

3.1.2 Тектоническое строение

Западно-Сибирская платформа, возникшая в позднем палеозое, относится к молодым и характеризуется трёхъярусным строением (фундамент, промежуточный этаж и чехол).

Нижний этаж, формировавшийся в палеозойское и допалеозойское время, отвечает геосинклинальному этапу развития современной платформы. Отложения этого

возраста составляют ее складчатый фундамент, представленный эффузивными, сильно дислоцированными осадочными и метаморфическими породами докембрия и палеозоя, прорванными интрузивными образованиями различного состава и возраста.

Средний структурно-тектонический этаж объединяет породы, отложившиеся в условиях парагеосинклинали, существовавшей в пермо-триасовое время. От образований складчатого фундамента эти породы отличаются меньшей степенью дислоцированности и метаморфизма.

Верхний, мезозойско-кайнозойский структурно-тектонический этаж - типично платформенный, формировавшийся в условиях длительного устойчивого погружения фундамента, характеризуется слабой дислоцированностью и полным отсутствием метаморфизма пород. Этот этаж, или собственно осадочный чехол Западно-Сибирской плиты, содержит основные промышленные скопления нефти и газа и поэтому является объектом детального изучения.

В тектоническом отношении (рис.22) исследуемый объект приурочен к северному склону Верхнесалымского мегавала (структуре II порядка), входящему в состав Салымской группы поднятий, расположенной к западу от крупного Сургутского свода. На западе Верхнесалымский мегавал граничит с Ханты-Мансийской котловиной, на востоке с Юганской впадиной, на севере – через Западно-Салымскую мегаседловину с Салымским мегавалом. В пределах Верхнесалымского мегавала выделяется группа небольших по размерам и малоамплитудных поднятий II-IV порядка субмеридионального простирания.

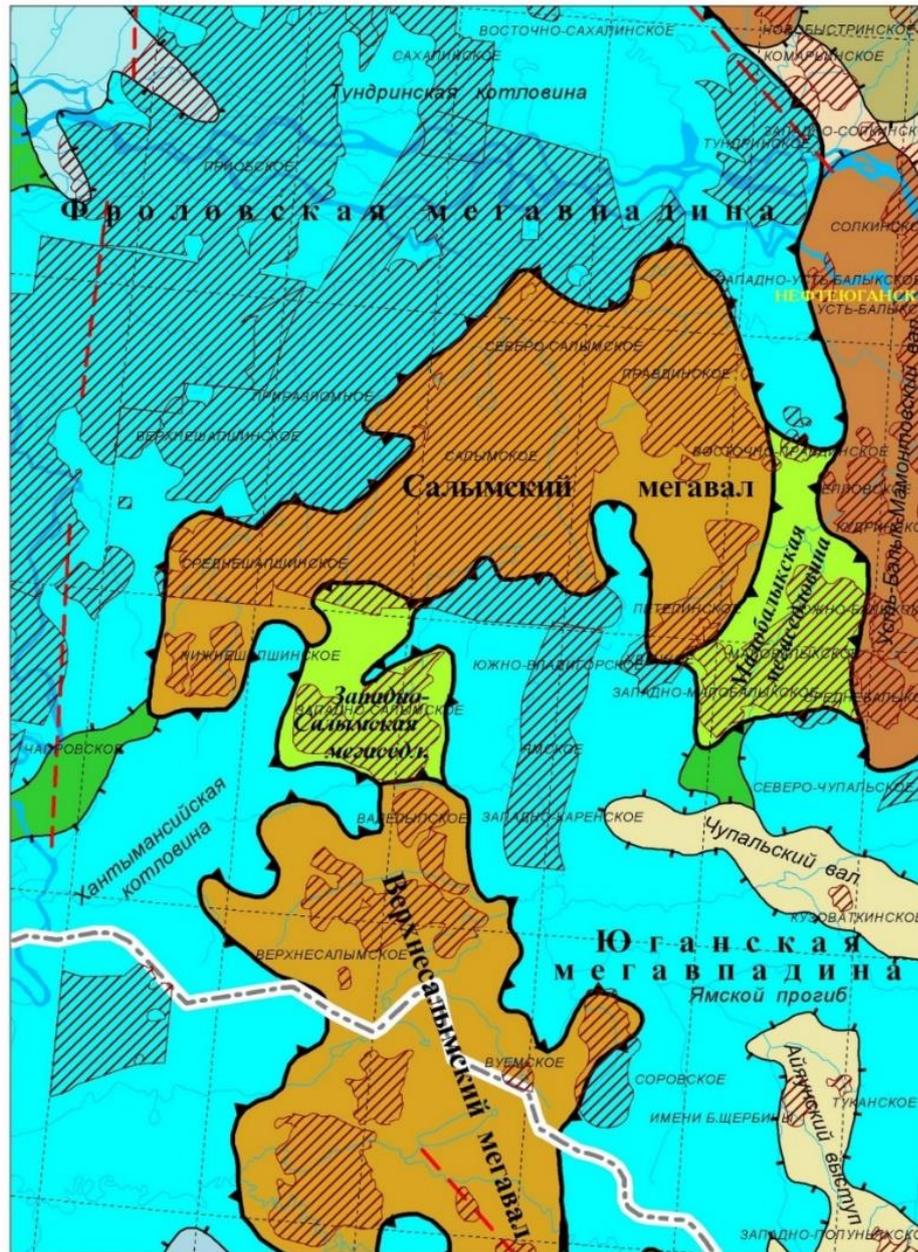


Рисунок 22 Фрагмент тектонической карты центральной части Западной-Сибирской плиты (под ред. Шпильмана В.И., Змановского Н.И., Подсосовой Л.Л., 1998)

3.2 Описание сейсмических данных

В данном разделе описаны технология проведения полевых сейморазведочных работ и основные этапы обработки сейсмических данных на территории исследуемого участка.

Площадь работ составила порядка 800 км², в качестве источника были использованы взрывные источники в скважинах. Основные параметры 3-D сейсмической съемки приведены в Таблице 1.

Таблица 1

Параметры сейсмической съемки

<u>Площадь работ, км²</u>	<u>800</u>
Шаг между линиями взрыва, м.	400
Шаг между источниками, м.	50
Количество каналов на линии приема	128
Количество линий приема на полосе	14
Шаг между линиями приема, м.	300
Размер бина, м.	25x25
Номинальная кратность	57
<u>Формат данных</u>	<u>SEG Y</u>
Длина записи, с.	5
Шаг дискретизации, мс.	2

Граф обработки сейсмических данных, выполненный специалистами «СЖЖВосток», представлен в таблице 2. Данные были обработаны в системе CGGV «Geovation». В качестве исходных данных для выполнения спектральной декомпозиции был использован куб сейсмических данных, полученный после временной миграции до суммирования.

Граф обработки данных МОВ ОГТ 3D

<u>Обработка до миграции</u>
Форматирование данных из SEG-Y в формат CGG.
Расчёт статических поправок по преломлённой волне с помощью пакета программ Geostar. Финальные значения статических поправок по преломлённой волне были разделены на высокочастотную и низкочастотную (региональную) составляющие.
Компенсация за сферическое расхождение. Использовался один скоростной закон, применяемый по формуле TxV^2 (T0).
Подавление высокоамплитудных шумов Подавление высокоамплитудных промышленных помех в различных частотных диапазонах с применением медианной фильтрации, в сортировке ОПВ.
Сортировка данных в кросс-спред область.
Подавление поверхностных волн с помощью модуля AGORA. Модуль применялся по данным, сортированным как кросс-спред. Диапазон скоростей подавления 10-300м/сек. Величина частот для подавления помех 5-25 Гц.
Поверхностно-согласованная коррекция амплитуд. Расчёт и ввод коррекции амплитуд за ПП и ПВ. Окно расчёта амплитуд - 450-3000 мс
Поверхностно-согласованная деконволюция сжатия (на выходе нуль-фазовый сигнал). Окно для расчёта оператора 500-3000 мс, Длина оператора: 240 мс Процент белого шума: 1%
Сортировка данных по ОСТ.
Первый скоростной анализ (1800 x 2000 м).
Первая итерация расчёта остаточных поверхностно-согласованных статических поправок Временной интервал для расчёта поправок: 800-2300 мс. Максимальный сдвиг 48 мс.
Второй скоростной анализ (900 x 1000 м).
Вторая итерация расчёта остаточных поверхностно-согласованных статических поправок. Временной интервал для расчёта поправок: 350-2450 мс. Максимальный сдвиг 24 мс.
Сортировка данных в кросс-спред область.
Дополнительное подавление линейных помех с помощью 3D FK фильтрации. Диапазон скоростей: 200-2500 м/сек, по кросс-спред сейсмограммам.
Сортировка данных по ОСТ.

Подавление случайных помех по ОСТ сейсмограммам.
Остаточная поверхностно-согласованная коррекция амплитуд. Расчёт и ввод коррекции амплитуд за ПП и ПВ. Окно расчёта амплитуд 500-2500мс.
Применение кинематических поправок (НМО).
Подавление случайных помех. Длина фильтра ошибки предсказания: 3x3 трасс. Размер элементарного блока данных 50X50 трасс.
<u>Временная миграция до суммирования</u>
Временная миграция до суммирования для линий скоростного анализа.
Третий скоростной анализ (900 x 1000 м) по мигрированным линиям.
Сглаживание полученного скоростного поля.
Миграция. Миграция Кирхгофа до суммирования с полученным скоростным полем.
<u>Обработка после миграции</u>
Сортировка данных в ОСТ.
Высокоточный анализ скоростей. Автоматическое уточнение параметров скорости и анизотропии с шагом по каждой второй ОСТ.
Применение кинематических поправок и параметров анизотропии.
Подавление кратных волн с применением высокоразрешающего преобразования Радона. Граница зоны подавления кратных (DTCUT): 150 мс на удалении 3700 м.
Подавление помех в верхней части разреза.
Мьютинг.
Суммирование данных.
Вывод сумм в формате SEG-Y до пост-обработки.
<u>Обработка после суммирования мигрированных сейсмограмм</u>
Подавление остаточного регулярного шума (следы расстановки, линейные помехи).
Подавление случайных помех.
Переформатирование финальной суммы после пост-обработки в SEG-Y.

3.3 Результаты спектральной инверсии на реальных данных

В качестве инструмента спектральной декомпозиции был использован алгоритм спектральной инверсии, результаты которой с целью обоснования возможностей

применения этого метода для динамической интерпретации сравнивались с результатами непрерывного вейвлет-преобразования.

Для выполнения спектральной декомпозиции была использована часть куба сейсмических данных, в ограниченном временном интервале, который относится к интересующему интервалу геологического разреза. – ачимовские отложения черкашинской свиты. В виду этого нулевая отметка времени – это начало отсчета времени в выбранной части куба. Выбор ограниченной части куба обусловлен возможностями вычислительной техники. Несмотря на то, что использована лишь часть куба, такой же подход можно применять и для полного объема данных.

На рисунке 23 представлены срезы по Inline 300 и Xline 300 исходного куба данных.

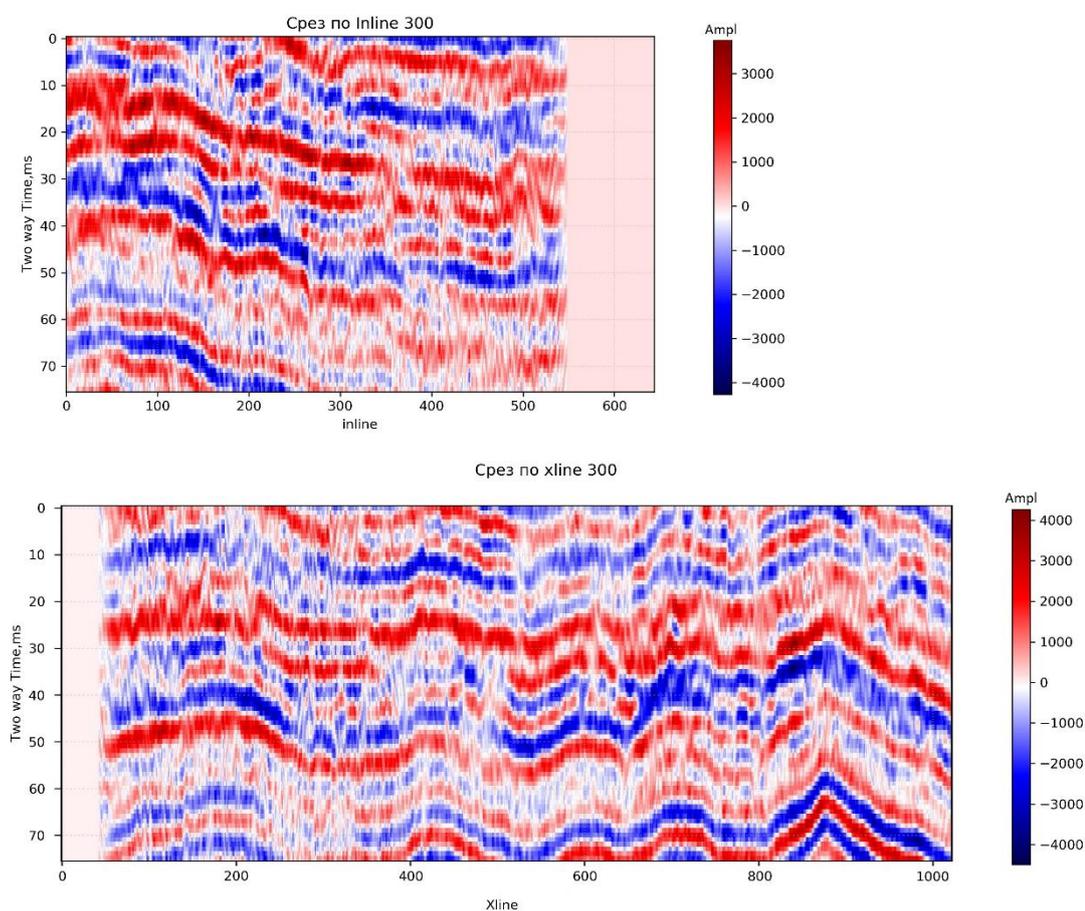


Рисунок 23 Срезы исходного куба данных по Inline 300 (наверху) и Xline 3300 (внизу) с исследуемого месторождения

Первый этап – подготовка данных к использованию алгоритмов спектральной декомпозиции. Для выполнения спектральной декомпозиции выбран интервал

Ачимовской свиты, его кровля и подошва была выделена в исходном кубе данных (рис. 24).

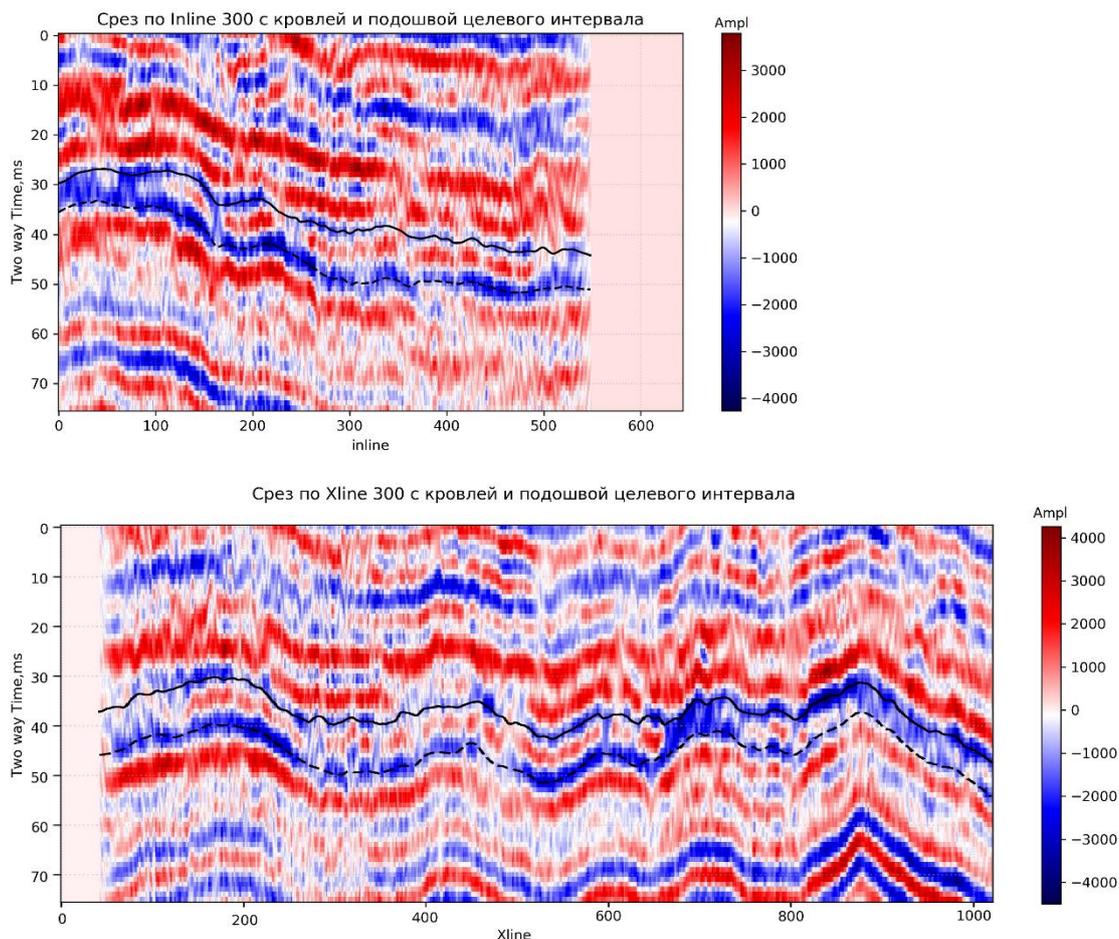


Рисунок 24 Срезы исходного куба по Inline 300 (наверху) и xline 300 (внизу) с выделенными кровлей и подошвой целевого интервала

Исходный куб подавался на вход алгоритмов вейвлет-преобразования и спектральной инверсии для выполнения декомпозиции и дальнейшего сравнения их результатов.

Второй этап анализа результатов спектральной декомпозиции – сравнительный анализ амплитудно-частотных срезов куба реальных данных для вейвлет-преобразования и спектральной инверсии для набора частот 10 Гц, 20 Гц, 30 Гц (рис.25-27).

Используя стандартный подход к визуализации данных спектральной декомпозиции по алгоритму спектральной инверсии и сравнивая его с вейвлет-преобразованием, было установлено, что спектральная инверсия показывает, в целом, идентичные результаты в сравнении с вейвлет-преобразованием, для локализации

аномалий волнового поля, связанных с интерференцией отражённых волн при уменьшении мощности пласта.

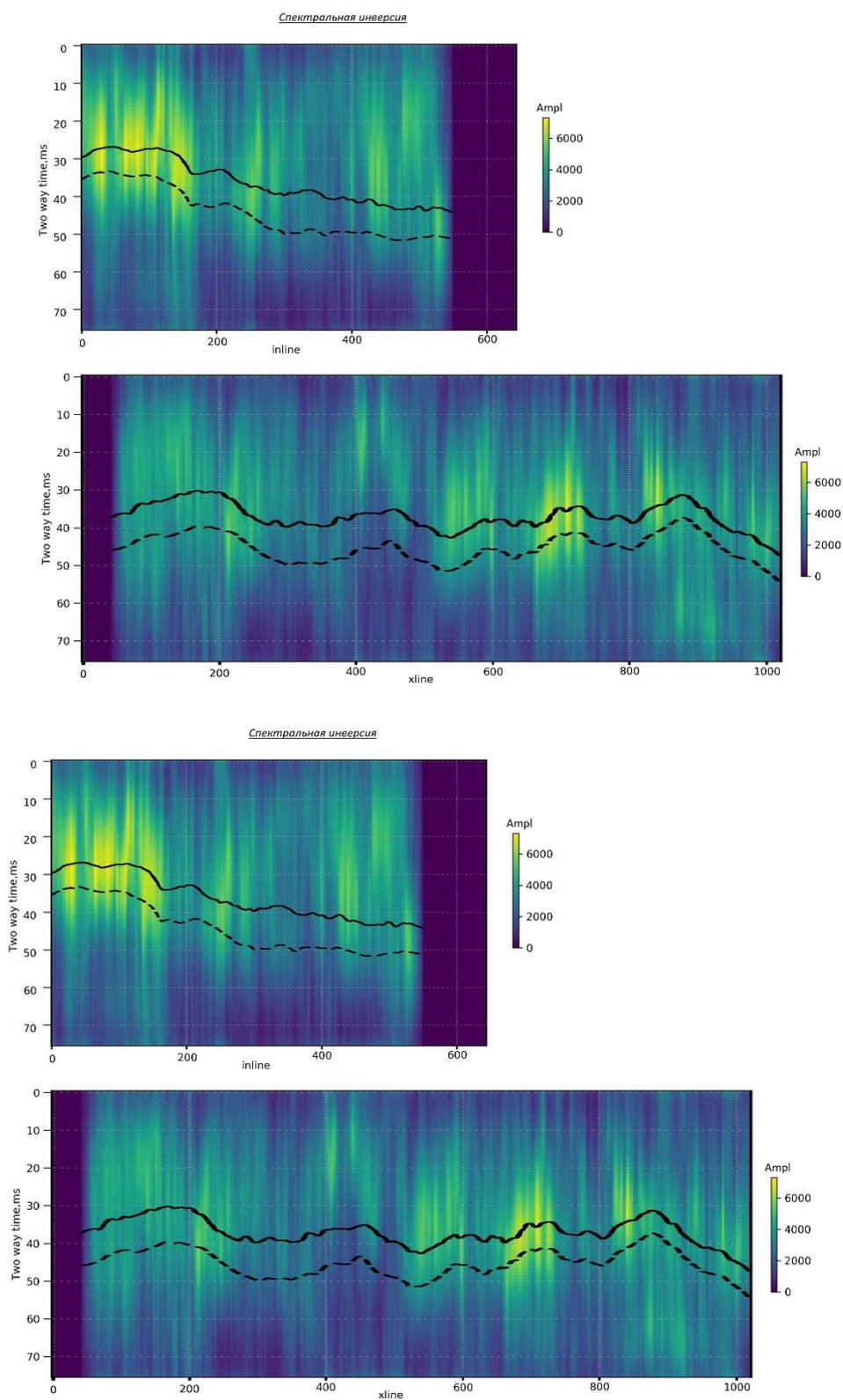


Рисунок 25 Амплитудно-частотные срезы (inline и xline) исходного куба для частоты 10 Гц, выполненные с помощью вейвлет-преобразования (наверху) и спектральной инверсии (внизу)

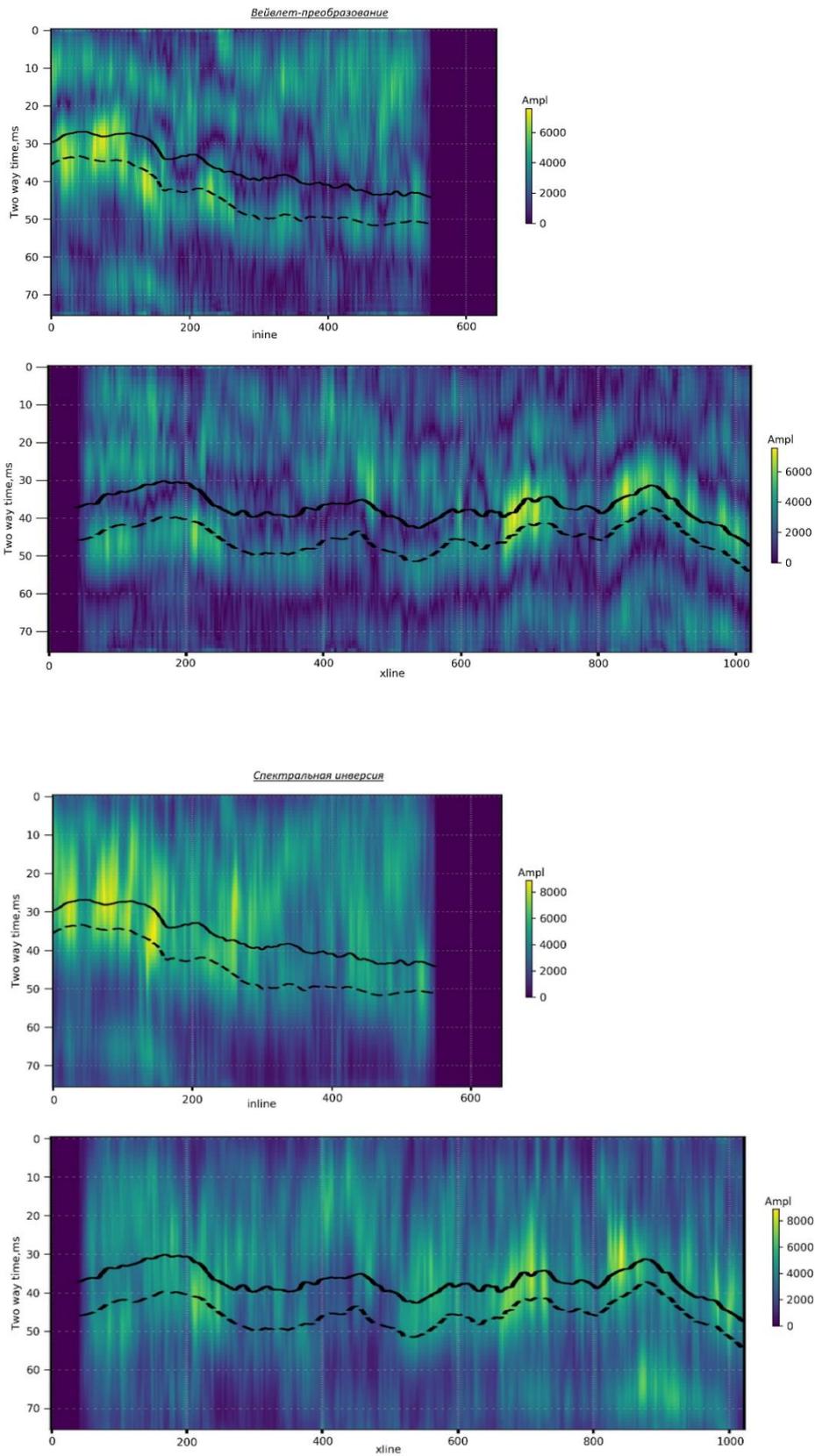


Рисунок 26 Амплитудно-частотные срезы (inline и xline) исходного куба для гармоника 20 Гц, выполненные по вейвлет-преобразованию (наверху) и спектральной инверсии (внизу)

На амплитудно-частотных срезах для гармоники 20 Гц можно отметить, что метод вейвлет-преобразования позволяет лучше локализовать аномалии в направлении inline. Амплитудные срезы по вейвлет-преобразованию, на реальных данных наблюдается лучшая локализация аномалий волнового поля.

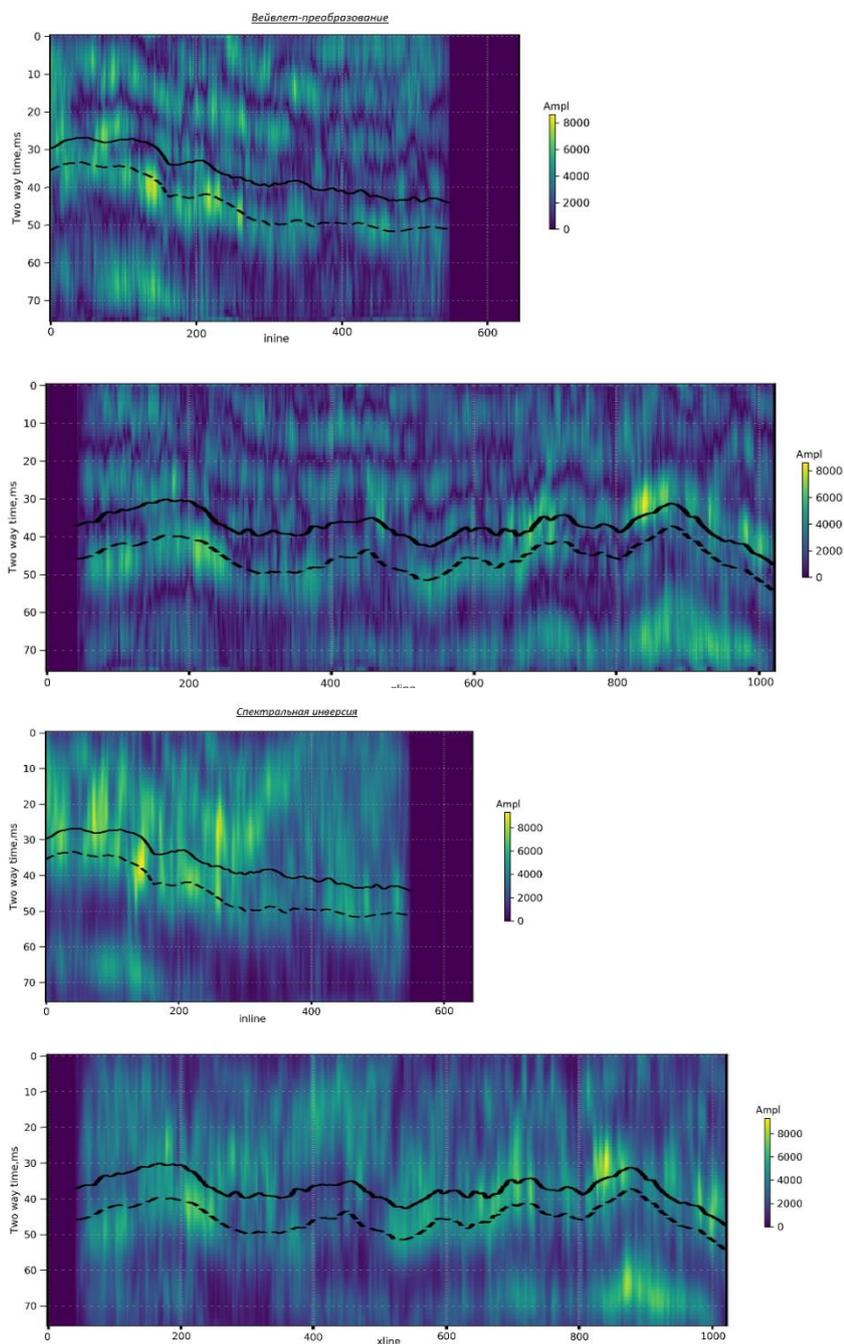


Рисунок 27 Амплитудно-частотные срезы (inline и xline) исходного куба для гармоники 30 Гц, выполненные по вейвлет-преобразованию (наверху) и спектральной инверсии (внизу)

Аналогичный результат наблюдается и для гармоники 30 Гц (см. рис. 27).

В итоге можно отметить, что результаты спектральной инверсии и вейвлет-преобразования являются идентичными для локализации аномалий волнового.

Поскольку наравне со стандартными подходами для визуализации результатов спектральной декомпозиции применяются и разрезы RGB-комбинирования, то для оценки метода спектральной инверсии на реальных данных выполнен анализ этих разрезов.

На вход алгоритма RGB-смешивания подавались амплитудные характеристики гармоник 10 (R), 20 (G), 30 Гц (B). Результаты RGB-комбинирования представлены на рисунке 28.

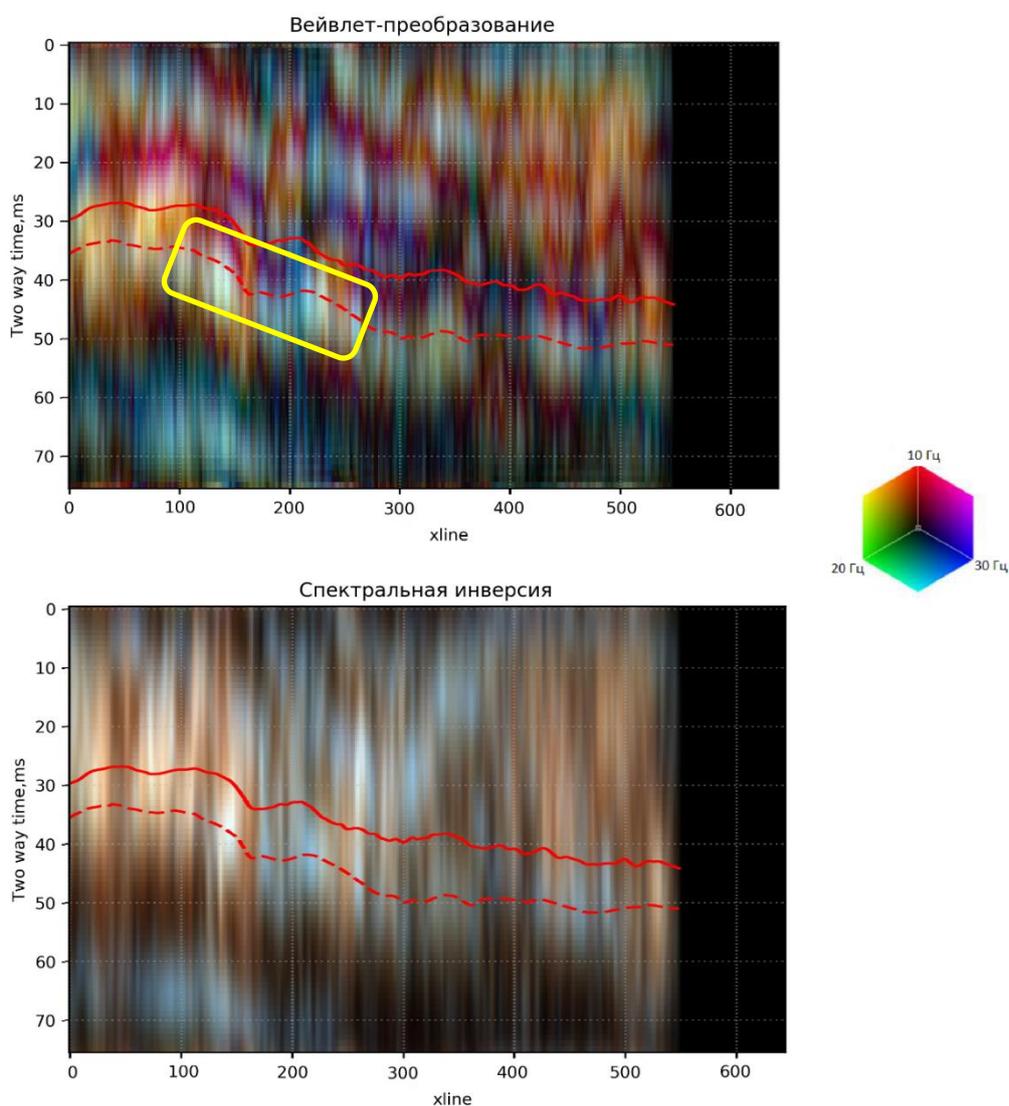


Рисунок 28 RGB-разрез по Inline 300 построенный по спектральной инверсии (слева) и вейвлет-преобразованию (справа) (желтым выделен конус выноса)

На разрезе по вейвлет преобразованию в центральной части исследуемого интервала наблюдаются интенсивные спектральные аномалии, которые отвечают, согласно геологическим данным, конусу выноса, по этим каналам происходило перераспределение осадочного материала в рамках разреза.

В виду более низкой цветовой дифференциации результатов RGB-смешивания для спектральной инверсии отсутствует возможность выделения каналов данного типа на этих разрезах. В целом применение методики RGB-визуализации для результатов спектральной инверсии не актуально, так как выделение объектов по разрезам невозможно.

Использование коэффициентов отражения, полученных по алгоритму спектральной инверсии, является наиболее информативным методом представления результатов, позволяющим существенно повысить разрешающую способность. На рисунке 29 представлен срез куба коэффициентов отражения по inline 300. На разрезе коэффициентов отражения по Inline 300 алгоритм позволяет выделить палеоканалы, соответствующие конусу выноса, внутри целевого интервала, которые невозможно распознать на исходном волновом поле. Аномалии амплитудно-частотных характеристик для набора гармоник служили предпосылками к выделению этих объектов, однако наблюдать их геометрию не представилось возможным.

Установление геометрии этих тел возможно по RGB-разрезам для вейвлет-преобразования. Также, с наибольшей точностью, восстановить их геометрию позволяет использование коэффициентов отражения (аппроксимации), полученных в результате применения спектральной инверсии.

Таким образом, можно сделать вывод, что несмотря на отсутствие цветовой дифференциации карт RGB и худшую локализацию аномалообразующих объектов при стандартном подходе амплитудно-частотного анализа, алгоритм спектральной инверсии благодаря возможности использования коэффициентов отражения является информативным инструментом для динамического анализа сейсмического волнового поля.

Коэффициенты отражения полученные по спектральной инверсии

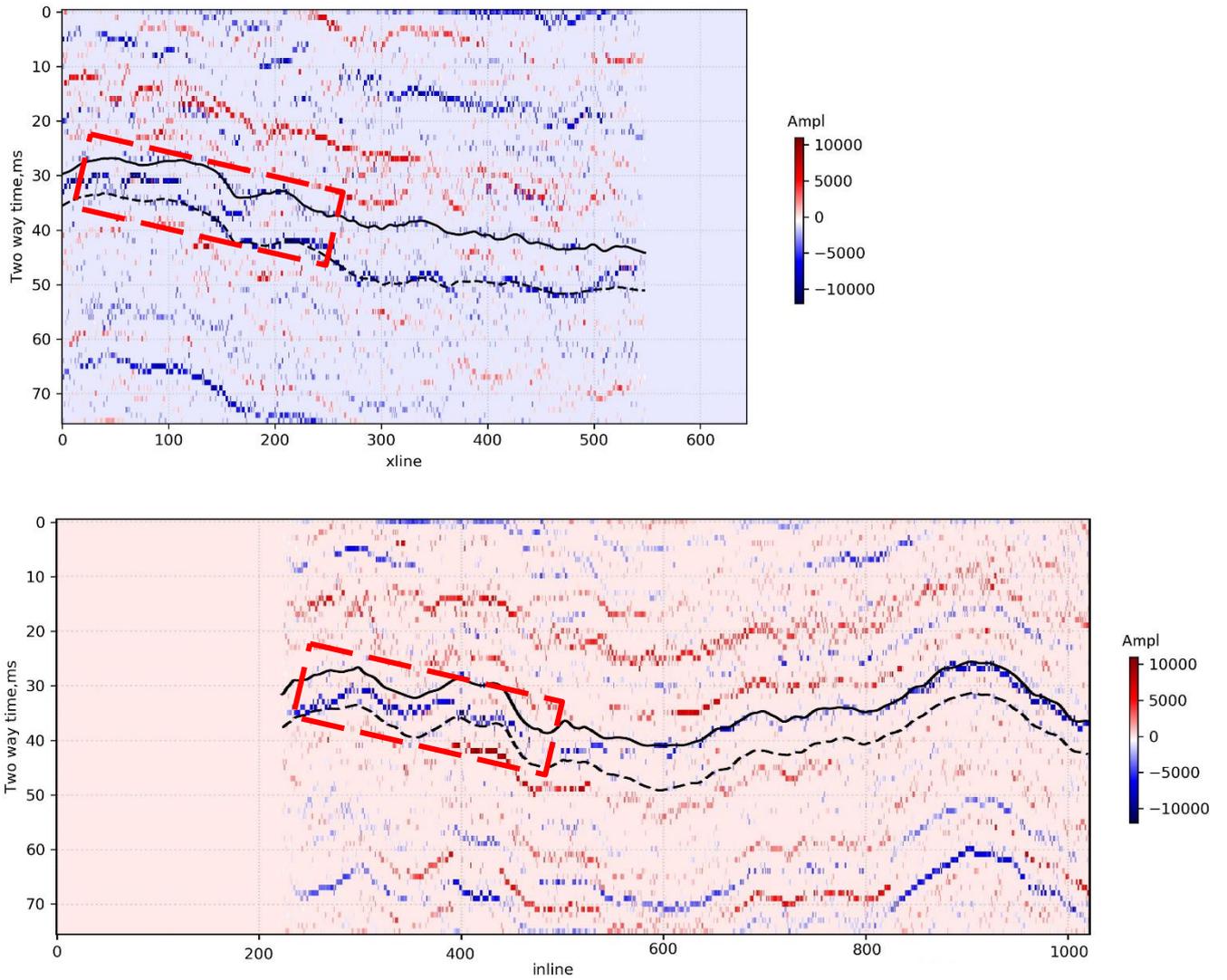


Рисунок 29 Коэффициенты отражения, полученные по спектральной инверсии, разрез Inline 300 (наверху) и xline 150 (внизу) (красным выделен интересующий объект)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках исследования были рассмотрены теоретические основы методов спектральной декомпозиции: преобразование Фурье, оконное преобразование Фурье, вейвлет-преобразование, а также спектральная инверсия.

- Преобразование Фурье имеет ряд ограничений, основным из них является отсутствие возможности локализации спектра сигнала по времени.
- Оконное преобразование позволяет отчасти избавиться от этих ограничений, однако на результат преобразования влияет размер выбранного окна.
- Вейвлет-преобразование лишено всех этих ограничений, оно позволяет с достаточной точностью локализовать спектр сигнала по времени.
- Спектральная инверсия как разновидность вейвлет - анализа позволяет за счет использования библиотеки вейвлетов наиболее точно локализовать спектр сигнала.

Выполнено тестирование алгоритма спектральной инверсии на модельных данных в виде куба синтетического волнового поля.

Получены следующие основные выводы:

- Графики амплитуд, построенные на основе спектральной инверсии, позволяют однозначно локализовать аномалии волнового поля, связанные с интерференцией отраженных волн при уменьшении мощности выклинивающегося пласта.
- Визуализация методом RGB-смешивания результатов спектральной инверсии не является информативной с точки зрения цветовой дифференциации выклинивающегося пласта.
- Результаты спектральной инверсии обеспечивают высокую степень подобия между коэффициентами отражения, восстановленными по сейсмической трассе с применением алгоритма спектральной инверсии, и исходными коэффициентами, заданными для модели, что делает метод спектральной инверсии информативным для определения этого коэффициента.
- Спектральная инверсия позволяет определить границы рефлекторов в области минимальной временной мощности, а также получить новую информацию для сейсмогеологического моделирования.

Выполнено тестирование алгоритма спектральной инверсии на реальных сейсмических данных на месторождении в Ханты-Мансийском автономном округе). Получены следующие основные выводы:

- При амплитудно-частотном анализе данных спектральная инверсия показала, в целом, идентичный результат в сравнении с вейвлет-преобразованием.
- Применение RGB визуализации результатов спектральной инверсии является не эффективным, в виду худшей цветовой дифференциации в сравнении с вейвлет-преобразованием, которое при данном методе визуализации позволяет выделить конусы выноса.
- Полученные при спектральной инверсии коэффициенты отражения позволяют детальнее картировать палеоканалы, которые составляют конусы выноса в толще продуктивного интервала (ачимовские отложения Черкашинской свиты). Использование этой характеристики позволяет существенно повысить возможность определения геометрии выклинивающихся пластов, палеорусел, каналов и других объектов, выделение которых при стандартных подходах спектральной декомпозиции является затруднительным.



Мусралиев Арман Жарасович.

15.05.2020 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Буторин А.В. Сравнительный анализ методов спектральной инверсии волнового поля на примере модельных трасс / А.В. Буторин, Ф.В. Краснов // Геофизика. – 2016. – №4. – С. 68-76.
2. Буторин А.В. Изучение спектральных характеристик волнового поля на примере модельных данных по результатам вейвлет-преобразования / А.В. Буторин // Геофизика. – 2016. – №4. – С. 61-67.
3. Буторин А.В., Краснов Ф.В., Михеенков А.В. Восстановление коэффициентов отражения среды по сейсмическим данным при помощи методов машинного обучения // Вестник Евразийской науки, 2018 №1.
4. Граничин О.Н. «Рандомизация измерений и L1 оптимизация», СПбГУ, 2009.
5. Краснов Ф.В., Буторин А.В., Михеенков А.В. Уточнение постановки задачи поиска позиций и амплитуд коэффициентов отражения среды по сейсмической трассе // Вестник Евразийской науки, 2018 №3.
6. Федоров, Д. Ю. Программирование на языке высокого уровня Python : учеб. пособие для прикладного бакалавриата / Д. Ю. Федоров. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Издательство Юрайт, 2019. — 161 с.
7. Яковлев А.Н. Введение в вейвлет-преобразования / А.Н. Яковлев. – Новосибирск. – изд. НГТУ. – 2003. – 104 с.
8. Butorin A.V. Application of wavelet spectral decomposition for geological interpretation of seismic data / A.V. Butorin // Journal of Geological Resource and Engineering. – 2016. – vol. 4. – №5. – p. 231-241.
9. Calazans M. Use of Color Blend of seismic attributes in the Exploration and Production Development – Risk Reduction [Электронный ресурс] / M. Calazans, P. Jilinski. // SEG New Orleans Annual Meeting. – 2015.
10. Chakraborty A.D. Okaya, Frequency-time decomposition of seismic data using wavelet based methods / A.D. Chakraborty // Geophysics. – 1995. – vol. 60. – p. 1906-1916
11. Daubechies I. Ten lectures on wavelets / I. Daubechies. – Society for Industrial and Applied Mathematics. – 1992. – 357 p.
12. Gabor D. Theory of communication / D. Gabor // Journal of the Institute of Electrical Engineers. – 1946. – p. 429–457.
13. Mallat, S., and Z. Zhang, 1992, Matching pursuit with time-frequency dictionaries: Technical Report 619, IEEE Transactions in Signal Processing, 41, 3397-3415.

14. Morlet J. Wave propagation and sampling theory - Part I: Complex signal and scattering in multilayered media / J. Morlet, G. Arens, E. Fourgeau, D. Giard. // *Geophysics*. – 1982. – vol. 47. – p. 203–221.
15. Morlet J. Wave propagation and sampling theory—Part II: sampling theory and complex waves / J. Morlet, G. Arens, E. Fourgeau, D. Giard. // *Geophysics*. – 1982. – vol. 47. – p. 222-236.
16. McArdle N.J. Understanding seismic thin-bed responses using frequency decomposition and RGB blending / N.J. McArdle, M.A. Ackers. // *First break*. – 2012. – vol. 30. – p. 57-65.
17. Polikar R. (пер.Грибунина В.Г.) Введение в вейвлет-преобразование // Iowa State University – 2006. – .59 с.