

Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Всероссийский научно-исследовательский геологический институт
им. А.П. Карпинского»

На правах рукописи

Буторин Александр Васильевич

**ИЗУЧЕНИЕ ДЕТАЛЬНОГО СТРОЕНИЯ АЧИМОВСКОГО
НЕФТЕГАЗОНОСНОГО КОМПЛЕКСА НА ОСНОВЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ
ДЕКОМПОЗИЦИИ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЛНОВОГО ПОЛЯ**

Специальность 25.00.10 - Геофизика, геофизические методы поисков полезных
ископаемых

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель:
кандидат геолого-минералогических наук
Дараган-Суцова Лидия Анатольевна

Санкт-Петербург – 2016

Оглавление

Введение.....	4
Глава 1. Геологический обзор.....	13
1.1 История развития представлений об ачимовской свите.....	13
1.2 Строение ачимовской толщи на изучаемом месторождении.....	21
1.3 Сейсмогеологическая характеристика ачимовской толщи	31
1.3.1 Привязка данных геофизических исследований скважин к волновому полю.....	31
1.3.2 Палеогеографический анализ	35
1.3.3 Анализ волнового поля.....	40
Глава 2. Спектральная декомпозиция волнового поля	45
2.1. Преобразование Фурье	45
2.2. Вейвлет-преобразование	48
2.2.1 Теория вейвлет-преобразования.....	48
2.2.2 Требования к вейвлетам	50
2.2.3 Непрерывное вейвлет-преобразование.....	52
2.2.4 Визуализация результатов спектральной декомпозиции.	53
Глава 3 Исследование особенностей непрерывного вейвлет-преобразования на модельных данных.	55
3.1 Моделирование волнового поля.....	56
3.2 Качественный анализ результатов моделирования	58
3.3 Количественный анализ результатов непрерывного-вейвлет-преобразования	64
3.4 Возможности применения спектрального анализа.....	75

Глава 4. Практическое применение метода спектральной декомпозиции на реальных материалах.	79
4.1 Анализ полученных спектральных данных.....	82
4.2 Технологии качественного анализа и визуализации спектральных данных.	84
4.2.1 Технология RGB-визуализации.....	84
4.2.2 Технологии объемной интерпретации.....	104
4.2.3 Методы кластерного анализа.....	106
4.3 Методы количественной оценки спектральных характеристик	108
Глава 5. Результаты анализа геологических объектов ачимовской толщи Ноябрьского региона	113
5.1 Детальный анализ изучаемого месторождения	114
5.1.1 Подбор современных аналогов.....	114
5.1.2 Результаты изучения ачимовских залежей	117
5.1.2.1 Южная залежь	117
5.1.2.2 Основная залежь	118
5.1.3 Апробация результатов исследования.....	123
5.2 Региональное картирование перспективных песчаных тел внутри ачимовской толщи в пределах Ноябрьского региона	125
Заключение	132
Список литературы	137

Введение

Диссертационная работа посвящена детальному изучению продуктивных ачимовских отложений с использованием спектрального анализа отраженных волн. Особое внимание уделено обоснованию применимости алгоритма спектральной декомпозиции при геологической интерпретации волнового поля, а также разработке наиболее эффективных методов анализа получаемых результатов.

В структуре исследования выделено несколько этапов, последовательно раскрытых в тексте диссертации. Выполнено детальное геологическое описание объекта исследования с обоснованием необходимости использования метода спектральной декомпозиции для его изучения. На основании имеющейся научной литературы рассмотрены основные алгоритмы спектральной декомпозиции волнового поля и дано обоснование оптимального подхода, которое в дальнейшем подтверждено практическим результатом. При помощи математического моделирования получено синтетическое волновое поле для объемной модели выклинивающегося пласта переменной акустической жесткости. Модельное волновое поле было изучено при помощи метода спектральной декомпозиции, что позволило определить основные факторы, влияющие на возникновение частотных аномалий. Описан оптимальный подход к визуализации спектральных данных, а также разработан собственный алгоритм RGB-визуализации, опробованный в рамках деятельности Компании «Газпромнефть НТЦ». Изучены подходы к анализу спектральных данных, в том числе разработано несколько алгоритмов, позволяющих анализировать получаемые спектральные данные.

Применение метода спектральной декомпозиции волнового поля рассмотрено на примере ачимовского комплекса одного из месторождений Западносибирского бассейна. Строение комплекса, а также набор исходных геолого-геофизических данных является достаточно характерным для данного региона, что позволяет экстраполировать полученный теоретический и

практический результат на другие месторождения Западной Сибири, а также районы со схожим геологическим строением, например, Панонский бассейн. Выводы, полученные на реальных данных, позволили детально изучить ачимовскую залежь и легли в основу геологической модели, использованной при планировании разработки пласта. Результаты бурения показывают высокую степень достоверности прогноза.

Актуальность темы исследования

Актуальность исследования связана с увеличением доли сложных литологических объектов в структуре разрабатываемых нефтегазовых залежей. Изучение подобных геологических объектов требует разработки и применения новых методов интерпретации сейсмического волнового поля для построения достоверных геологических моделей.

В настоящее время в ачимовских пластах Западной Сибири открыто более 100 залежей нефти, газа и конденсата, многие, из которых относятся к крупным. Модель формирования и генезис ачимовской толщи являются дискуссионными вопросами. Учитывая перспективность указанных отложений для поиска залежей УВ, изучение строения и условий формирования этих отложений является актуальной задачей.

Таким образом, с геологической позиции актуальность исследования связана с недостаточной изученностью пород ачимовских пластов. Этот факт в первую очередь связан со специфическими обстановками седиментации комплекса, которые приводят к образованию залежей литологического типа, характеризующихся резкой изменчивостью как по вертикали, так и по латерали. Изучение подобных отложений требует прогноза распространения коллектора в межскважинном пространстве с использованием площадных сейсмических данных и современных алгоритмов их анализа.

В рамках диссертации обоснована возможность использования спектральной декомпозиции волнового поля с целью увеличения достоверности сейсмогеологических моделей. Доказательство возможности применения метода и

его эффективность показаны как на модельных, так и на реальных сейсмогеологических данных. Полученные в ходе исследования результаты могут быть использованы в дальнейшем для изучения геологического строения продуктивных комплексов.

Использование спектрального разложения волнового поля позволило с высокой детальностью спрогнозировать строение продуктивного комплекса, а также выделить характерные геологические тела в пределах Ноябрьского региона. Полученные результаты являются актуальными с прикладной точки зрения для дальнейшего развития добычи в Ноябрьском регионе, так как позволяют определить перспективные участки для постановки поисково-разведочного бурения с высоким потенциалом открытия новых залежей.

Степень разработанности

Одной из первых отечественных работ, посвященных использованию спектрального анализа волнового поля, является статья И.И. Гурвича [10]. Основные выводы статьи построены на изучении интерференционного взаимодействия отражений плоской волны от кровли и подошвы маломощного пласта.

Современные способы частотного анализа насчитывают несколько методик, которые могут быть разделены на два класса.

Первый класс алгоритмов предполагает использование преобразования Фурье. Развитием направления в область частотно-временного описания спектра, является появление преобразования Гэбора [23, 25]. Технология основывается на применении преобразования Фурье в локальном скользящем окне; при этом важным вопросом является выбор оконной функции [34]. Развитие метода привело к возникновению S-преобразования [46], в рамках которого оконная функция подбирается в зависимости от анализируемой частоты. Недостатком данного класса технологий является значительная зависимость результатов анализа от выбора окна расчета спектральных характеристик, а также несоответствие гармонической функции сейсмическому сигналу [21].

Второй класс алгоритмов включает в себя технологии, основанные на использовании вейвлет-анализа. Появление термина вейвлет связано с работами Морле в начале 80-х годов XX века [40, 41], которые послужили началом интенсивного исследования вейвлетов в последующие годы [24, 27, 34]. Развитие метода вейвлет-анализа привело к появлению непрерывного вейвлет-преобразования (НВП). Его использование в рамках изучения сейсмических сигналов описано в работах [22, 44]. Дальнейшее развитие метода привело к появлению метода спектральной инверсии, описанной в работе Молла [35], которая заключается в разложении сигнала по заданной библиотеке вейвлетов. Как показано в работе Кастаньи [21], использование технологии спектральной инверсии позволяет точнее и детальнее восстановить спектр сейсмической трассы.

Спектральная информация используется в различных технологиях интерпретации волнового поля для прогнозирования свойств коллектора [42], анализа маломощных геологических объектов [36], картирования особенностей пласта, таких как палеоканалы [26, 32] и рифовые постройки [30], для оценки затухания сейсмического сигнала [43], а также для возможного прогнозирования углеводородов по низкочастотным теневым областям [20] и высокочастотным откликам [31]. Значительное развитие спектрального анализа связано с появлением специализированного мульти-цветового алгоритма визуализации – RGB-смешивание [33, 45].

В современной сейсморазведке технология спектральной декомпозиции является широко используемым алгоритмом анализа, в том числе для прогноза строения сложных литологических залежей [1-8,16-19, 28, 37-39].

Цели и задачи

Цель исследования заключается в разработке и обосновании применимости подходов к интерпретации результатов спектральной декомпозиции сейсмического волнового поля для детального прогнозирования внутреннего строения продуктивного ачимовского комплекса и выделения перспективных объектов.

Выполнение поставленной цели предусматривает решение ряда задач, связанных как с выбранным объектом исследования, так и с используемой методикой анализа волновых полей:

- Сравнительный анализ методик спектральной декомпозиции на примере целевого ачимовского пласта;
- Определение основных характеристик геологического разреза, влияющих на характер спектральных аномалий волнового поля, на примере математической модели ачимовского пласта;
- Выбор наиболее информативных способов анализа спектрального состава сейсмических записей и их сравнение со стандартными методами динамической интерпретации;
- Определение строения целевого ачимовского интервала на основе комплексирования геологической информации по скважинам и результатов изучения спектрального состава волнового поля;
- Картирование перспективных объектов ачимовской толщи в пределах Ноябрьского региона.

Выполнение поставленных задач позволит установить оптимальный подход к использованию результатов спектральной декомпозиции, а также определить основные факторы, контролирующие продуктивность ачимовских отложений изучаемого региона и возможность их поиска с привлечением результатов спектральной инверсии, что позволит определить основные методические рекомендации по использованию технологии в промысловой геологии.

Научная новизна

Научная новизна исследования связана с развитием метода спектральной декомпозиции в области динамического анализа сейсмических данных, а также предложенными способами интерпретации спектральных данных для ачимовского типа отложений. В рамках исследования получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной:

На примере трехмерной синтетической модели определены основные факторы, влияющие на возникновение спектральных аномалий, а также проанализированы возможности применения спектральных характеристик для прогноза свойств;

Обоснован оптимальный алгоритм RGB-представления результатов спектральной декомпозиции, а также предложен подход к интерпретации многомерных данных, основанный на получении цифрового RGB-представления, что позволяет без потери качества анализировать RGB-массивы без использования специализированного ПО. Разработан метод визуализации названный «цифровой RGB анализ» и реализованный в виде отдельного программного модуля.

Дополнены алгоритмы анализа спектральных характеристик отраженных волн, позволяющие получить детальную информацию о геологическом строении продуктивного комплекса. Обоснована эффективность интерпретации спектральных данных при помощи частотного куба, позволяющего анализировать динамические характеристики целевого отражения. Разработанный метод анализа (атрибут) получил название «спектральная кривая» и также был реализован как отдельный программный модуль.

Получена детальная схема распространения перспективных объектов в пределах Ноябрьского региона по результатам регионального обобщения сейсмической и геологической информации, установлена зависимость распространения коллектора в разрезе от наличия областей лавинной седиментации.

Теоретическая и практическая значимость

В работе обоснованы возможности использования метода в промысловой геологии для целей прогноза перспективных геологических объектов. Полученные результаты характеризуются инвариантностью по отношению к объекту исследования, что позволяет использовать результаты на других месторождениях с учетом специфики сейсмогеологических условий. Предлагаемый алгоритм визуализации результатов RGB-смешивания позволяет перейти к количественному

анализу получаемых результатов, что являлось невозможным ранее в существующих программных комплексах. Предлагаемые в рамках исследования алгоритмы анализа представляют практическую значимость и могут быть использованы при интеграции сейсмических данных в геологическую модель.

Практическая значимость исследования связана с получением новых сведений о строении ачимовских отложений в рамках изучаемого региона. Результаты исследования обосновывают предположения об остановках седиментации продуктивного пласта, подтверждающиеся фактическим материалом скважин. Полученные результаты распространены на весь Ноябрьский регион, что позволило построить детальную схему распространения перспективных геологических тел внутри ачимовской толщи на основании результатов спектральной декомпозиции. Наличие схемы наиболее перспективных участков обеспечивает планирование дальнейшей разведки региона с высоким потенциалом открытия залежей.

Методология и методы исследования

Изучение возможностей применения метода спектральной декомпозиции выполнено как на модельном, так и на реальном волновом поле.

Построение модели геологической среды, получение синтетического волнового поля, выполнение спектральной декомпозиции и анализ полученных спектральных данных в собственном программном модуле, разработанном автором в ходе диссертационного исследования на базе научно-технического центра ПАО «Газпром нефть».

Защищаемые положения

1. Подтверждена связь продуктивных участков ачимовской толщи с развитием локальных турбидитовых систем в относительно глубоководных условиях эпиконтинентального бассейна на основе комплексного изучения геолого-геофизической информации с привлечением спектрального анализа сейсмических данных.

2. Для детального изучения геометрии и внутреннего строения песчаных тел ачимовской толщи является эффективным использование непрерывного вейвлет-преобразования по сигналам Рикера в сочетании с методикой интерпретации "цифрового RGB".

3. При прогнозировании ёмкостных свойств песчаных тел ачимовской толщи обосновано использование локального спектра волнового поля (атрибута "спектральная кривая"), как наиболее информативной характеристики сейсмических данных.

Апробация результатов

Апробация выполнена на ряде месторождений компании ПАО «Газпром нефть». Использование полученных результатов осуществлялось как на стадии построения концептуальной геологической модели пласта, так и на этапе мониторинга эксплуатационного бурения.

Наиболее значительные результаты получены на следующих месторождениях:

- Еты-Пуровское – построение моделей двух залежей пласта БП16 и мониторинг эксплуатационного бурения. По результатам исследования успешно пробурено более 10 скважин;
- Вынгаяхинское - построение моделей четырех залежей пласта БП12 и мониторинг эксплуатационного бурения. По результатам исследования успешно пробурено более 10 скважин;
- Меретояхинское – построение концептуальной модели пласта БП6. Выявлены перспективные области под постановку мероприятий ГРП;
- Романовское - построение моделей двух залежей пласта БС10 и мониторинг эксплуатационного бурения. Выявлены перспективные области под постановку мероприятий ГРП;

- Ярайнерское – картирование перспективных геологических тел внутри ачимовского интервала, определение участков незатронутых бурением;
- Вынгапуровское – изучение перспектив и выделение геологических объектов внутри ачимовского интервала;
- Новогоднее – построение концептуальной геологической модели ачимовского интервала отложений;
- Северо-Янггинское – построение концептуальной геологической модели и выделение перспективных участков внутри пластов Ач;
- Северо-Пямалияхское - картирование перспективных геологических тел внутри ачимовского интервала;
- Салымское – построение концептуальных моделей ачимовских залежей;
- Восточно-Мыгинское - построение модели пласта Ю1 и мониторинг эксплуатационного бурения;
- Новогоднее - построение концептуальной модели пласта ЮВ2;
- Милошево (Сербия) - построение концептуальной модели строения газовых пластов (4 пласта).

Предлагаемые разработки в области анализа спектральных данных включены в технологическую стратегию развития Компании ПАО «Газпром нефть».

Глава 1. Геологический обзор

Ачимовский нефтегазоносный комплекс, связанный с отложениями нижнемелового возраста, является объектом изучения на протяжении многих лет. В ачимовских пластах в настоящее время открыто более 100 залежей нефти, газа и конденсата, многие, из которых относятся к крупным. Учитывая перспективность ачимовских отложений для поиска залежей углеводородов и необходимость детализации строения уже выявленных запасов, из которых в настоящий момент разрабатываются единицы, изучение строения и условий формирования этих отложений является весьма актуальной задачей. Кроме этого, модель строения и генезис ачимовской толщи вплоть до настоящего времени являются дискуссионными вопросами.

1.1 История развития представлений об ачимовской свите

Представления о строении и генезисе неокомских отложений Западно-Сибирской платформы претерпели значительную эволюцию в течение последних 50 лет, особенно это касается ачимовского комплекса отложений. Важную роль в процессе развития представлений о строении ачимовской толщи сыграла сейсморазведка МОВ ОГТ. Её появление и распространение среди геофизических методов позволило в конечном итоге прийти к пониманию внутреннего строения и теории формирования неокомского клиноформного комплекса Западной Сибири.

В Стратиграфическом словаре мезозойских и кайнозойских отложений Западной Сибири ачимовская толща определяется, как совокупность невыдержанных по площади и разрезу линзовидных песчано-алевритовых пластов,

залегающих в основании неокома [9]. Выделение этого комплекса отложений в отдельную ачимовскую толщу было предложено Ф.В. Гурари в 1959 г.

Первая попытка построить детальную схему стратификации неокома принадлежит Л.Я. Трушковой (1966). Трушкова показала на профиле Песочно-Дубовская площадь – Красноленинский свод плоскопараллельную модель строения мезозойского чехла. В рамках полученной модели горизонтально лежащие свиты латерально замещали друг друга, при этом ачимовская пачка была представлена изолированными, но синхронными линзами, залегающими в основании.

Модель плоскопараллельного строения чехла Западно-сибирской плиты просуществовала достаточно долго – в Региональных стратиграфических схемах она сохранялась до 1978 г. Причины ее главенства во второй половине XX века объясняются несколькими факторами. Во-первых, использованием для корреляции разрезов скважин принципа сохранения мощностей, во-вторых, представлениями о мелководном и континентальном генезисе отложений. Оба этих факта являлись основой для принятия плоскопараллельной модели строения чехла. Данная концепция оставалась главенствующей, несмотря на сильные противоречия, связанные с палеонтологическими оценками возрастов свит, которые показывали значительное возрастное скольжение границ – омоложение с востока на запад [9].

Революцией в понимании строения неокомских отложений можно считать «клиноформную модель», предложенную А.Л. Наумовым (рис. 1). Согласно этой модели, изохронные поверхности в неокомских отложениях погружаются к баженовской свите. Одновозрастные отложения имеют резкую фациальную дифференциацию и представлены вблизи источников сноса континентальными, далее прибрежно-морскими и мелководно-морскими, а вблизи центра бассейна глубоководно-морскими фациями [10].

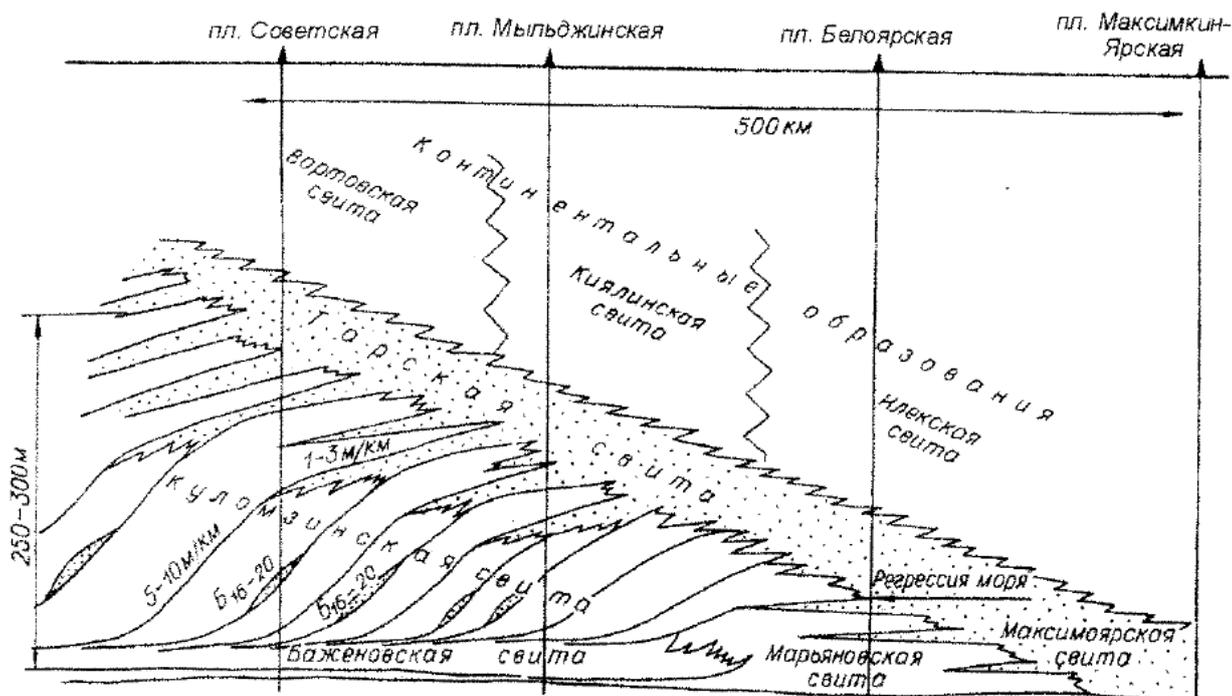


Рис. 1 Принципиальная модель формирования разреза верхнеюрско-валанжинских отложений в юго-восточной части Западно-Сибирской равнины (Наумов А.Л., 1977)

А.Л. Наумов пришел к следующим основным выводам:

1. В берриасе-валанжине Западно-сибирский морской бассейн представлял собой некомпенсированную впадину, в течение длительного времени постепенно заполнявшуюся с юго-востока обломочным материалом.

2. Песчаники ачимовской толщи формировались у подножия шельфа, медленно продвигавшегося к центру бассейна.

3. Шельф повсеместно имел региональный наклон к центру бассейна.

«В выдвинутой нами идее есть такое следствие – из-за мегакосослоистости мегионской свиты песчаники ачимовской пачки в нижней части свиты одновозрастны с ее шельфовыми пластами, залегающими в верхней части. Оно никаким образом не вытекает из каких-либо других взглядов на условия формирования неокомского разреза» (А.Л. Наумов, 1982 г.).

Наумов и сторонники клиноформной модели строения неокома связывают формирование ачимовской пачки с боковым заполнением морского бассейна терригенным материалом, поступавшим в неокоме преимущественно со стороны

горных образований Урало-Монгольского орогенного пояса. Большое влияние на формирование продуктивных ачимовских пластов, по мнению Наумова, оказали подводные оползни и турбидитные потоки [11].

Дальнейшее развитие теорий генезиса и строения чехла Западно-Сибирской низменности проходило в рамках клиноформной концепции, которая со временем все более прочно укреплялась в качестве основной.

Во второй половине 70-х – начале 80-х гг. в Западной Сибири происходит переход от сейсморазведки МОВ к модификации МОВ ОГТ. Использование методики многократного прослеживания рефлекторов позволило получить качественные сейсмические разрезы, более полно описывающие геологическое строение чехла. Развитие метода сейсморазведки подтвердило клиноформное строение чехла Западно-Сибирской плиты. Совместный анализ данных сейсморазведки и ГИС позволил связать наклонные отражения на сейсмических разрезах с выклинивающимися песчаными пластами; в районе прекращения корреляции отражения по скважинным данным происходило выклинивание пласта. Появление новых данных сейсморазведки помогло установить наличие неантиклинальных ловушек, связанных с литологическим замещением внутри ачимовской толщи, что способствовало усилению интереса к данным отложениям со стороны исследователей.

В течение конца XX столетия большинство исследователей связывало образование ачимовского комплекса с глубоководными фондоформными частями клиноформ, в седиментации которых большую роль играли турбидитные потоки и оползневые явления. Как пишет Ю.И. Карогодин в 1996 г.: «Ачимовская толща – это достаточно глубоководные образования погруженной части склона, фондоформная часть разновозрастных клиноформ - циклитов».

Большое значение в изучении клиноформ Западной Сибири имеют труды Ф.Г. Гурари. В своих исследованиях он сформулировал необходимые условия формирования клиноформ в краевых морях. Клиноформы, по мнению Ф.Г. Гурари [9], образуются при следующих условиях: длительный режим некомпенсации, большая площадь бассейна, стабильная область питания, теплый, влажный климат,

хорошо развитая, полноводная речная сеть. Особенно важны флуктуации климата (тайфуны, ураганы, длительные тропические ливни), инициирующие резкое усиление эродирующей и транспортирующей деятельности рек. Неокомские клиноформы образовывались пульсационно, периодически разделяясь длительными временными промежутками. Таким образом, Ф.Г. Гулари отдает главную роль в формировании клиноформ именно климатическим флуктуациям и связанной с этим явлением активизации поступления осадочного материала.

Большая роль в исследовании неокомского разреза Западно-Сибирской плиты принадлежит также работам Нежданова А.А. В своей работе [12] автор делает следующие основные выводы:

1. По текстурным особенностям породы ачимовской толщи следует отнести к группе фаций турбидитных (мутьевых) потоков и ассоциирующихся с ними фаций (склоновые шлейфы, оползни и т.п.).

2. Ачимовские песчано-алевритовые отложения характеризуются устойчивым составом аксессуаров – гранат-циркон-апатит, что свидетельствует о переработке исходного осадочного материала в активной гидродинамической обстановке (шельфовых зонах).

3. По изменению гранулометрического состава в разрезах песчаных пластов выделяются последовательности с увеличением размера зерен в кровле и подошве либо блоковые разрезы. По данным Д. Стоу (1990 г.), возрастание зернистости вверх по разрезу и блоковые образования характерны для глубоководных конусов выноса; последовательности с увеличением зернистости к подошве пластов более типичны для канальных песков турбидитных потоков.

С учетом геофизической и литологической информации образование ачимовских отложений Нежданов А.А. связывает с поступлением к подножиям неокомских шельфовых террас песчано-алевритовых осадков в виде турбидитовых потоков различной плотности и оползней. Эти явления связаны генетически и пространственно с областями разгрузки осадков, транспортируемых аллювиально-дельтовыми системами (рис. 2).

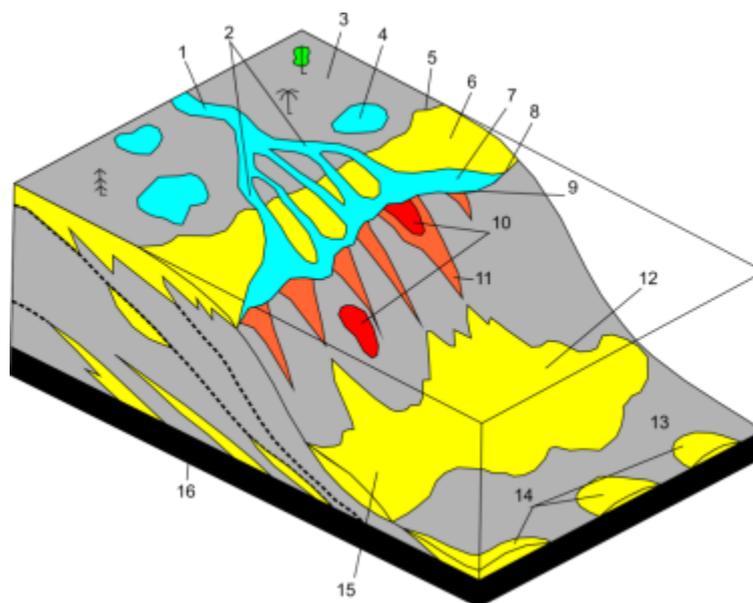


Рис. 2 Принципиальная схема формирования ачимовских отложений Западной Сибири (А.А. Нежданов) (1 – река; 2 – дельта реки; 3 – суша; 4 – приморские озера; 5 – береговая линия; 6 – шельф; 7 – бары открытого моря; 8 – бровка шельфа; 9 – плоскостной смыв; 10 – оползни; 11 – каналы мутьевых потоков; 12 – песчано-алевритовые конусы выносов мутьевых потоков (турбидиты); 13 – дистальные гемипелагические илы; 14 – песчаные волны (рифели); 15 – ачимовская толща; 16 – глубоководные глинисто-битуминозные отложения (баженовская свита)) [12].

Таким образом, основываясь на накопленных геолого-геофизических данных и большом количестве опубликованных исследований, можно сделать следующий вывод. В неокомское время территория современной Западно-Сибирской низменности являлась внутренним морем, заполнение которого осадками производилось в результате денудации Урало-Монгольского орогенного пояса и Сибирской платформы. При этом поступление осадков с восточной части бассейна было значительно более интенсивным, чем с западной, что выражается в меньшей выраженности Уральских клиноформ и их более глинистом составе.

Однако нет единого мнения о причинах и условиях формирования самих клиноформных структур пластов. Основная роль в этом процессе большинством исследователей отводится некомпенсированной седиментации в глубоководной

части бассейна и колебаниям уровня моря. Многими геологами найдена связь характера седиментации с кривой Вэйла, описывающей колебания уровня Мирового океана, что позволяет применять понятия сиквенс-стратиграфии при описании разреза. С регрессией связывают накопление песчано-алевритовых пачек, а с трансгрессией – более региональных глинистых отложений, отражающих поверхности максимального затопления. Однако смена характера седиментации в разрезе неокома более частая, чем колебания кривой Вэйла, что указывает на действие и других факторов в формировании чехла. Отмечается расхождение мнений исследователей относительно этих факторов. Некоторые приписывают важную роль тектонике, связанной с подкоровыми процессами (Артюшков, 1993), сдвиговой тектоникой (Старосельцева, 2000). Ф.Г. Гурари, как отмечалось выше, приписывает главную роль в формировании клиноформ климатическим флуктуациям, результатом которых является активизация выноса осадочного материала с континентальной части [9]. Эту точку зрения разделяют многие авторы. Нежданов А.А. связывает образование клиноформ с турбидитными потоками, являющимися продолжением дельтовых систем [12].

Как видно из приведенного анализа имеющейся научной геолого-геофизической информации, в настоящее время нет единой концепции формирования и генетической принадлежности клиноформного комплекса неокомской части разреза.

В рамках настоящего исследования, ачимовский комплекс рассматривается в единстве с его шельфовыми частями, образуя генетически связанный комплекс. Развитие ачимовской части цикла происходит в относительно глубоководной части бассейна. Отложение песчано-алевритовых пластов контролируется действием зон лавинной седиментации – турбидитных потоков, оползней и каналов транспортировки осадочного материала, поступающего с континентальной части. При этом поступление материала, вероятно, происходит периодически, что может быть связано с климатическим фактором. Тектоническим фактором также нельзя пренебрегать, так как различные тектонические активизации (например,

землетрясения) в равной степени могут приводить к резкому поступлению осадочного материала.

Исходя из условий седиментации и фациальной принадлежности ачимовской толщи, основными объектами для поиска и разработки с точки зрения нефтегазоносности являются геологические тела, приуроченные к областям лавинной седиментации – конусы выноса подводных турбидитных потоков, оползневые тела, каньоны транспортировки осадочного материала. Все приведенные геологические объекты характеризуются относительно локальной проявленностью, малой мощностью и малыми геометрическими размерами.

В настоящий момент большое количество исследователей связывает значительный УВ-потенциал именно с ачимовским комплексом, выделяя эти отложения в класс так называемых "пропущенных интервалов". На сегодняшний день открыто множество залежей, приуроченных именно к этой части разреза, однако их сложное строение заставляет отодвигать полномасштабную разработку ачимовской толщи на дальнейшую перспективу. Главную роль в решении этой проблемы играет современная площадная сейсморазведка, которая способна не только выделять перспективные геологические объекты внутри ачимовского пласта, но также выполнять их детальное расчленение с последующим прогнозом фильтрационно-емкостных свойств. Решение таких задач стало возможным с развитием динамической интерпретации волнового поля и совершенствованием методик динамического анализа.

Резюмируя современные представления о генезисе и строении неокомского разреза Западной Сибири, можно сделать вывод, что ачимовская пачка является относительно глубоководной частью клиноформы, которая накапливается в обстановках подножия шельфовой террасы. Поэтому каждая отдельная клиноформа будет характеризоваться наличием, так называемого ачимовского типа разреза – отложений связанных с действием систем выноса осадочного материала с мелководной части бассейна.

1.2 Строение ачимовской толщи на изучаемом месторождении

Месторождение, рассматриваемое в данной работе, приурочено к Пуровскому району Ямало-Ненецкого автономного округа. Геологический разрез изучаемой территории является классическим для Западно-Сибирской платформы и в рамках диссертации будет рассмотрен кратко.

Целевой, в рамках данного исследования, ачимовский комплекс представлен переслаиванием песчаника, алевролита и аргиллита. Песчаники светло-серые и серые, мелко- и среднезернистые, нередко известковые с прослоями аргиллитов. Алевролиты серые, мелко- и среднезернистые, слюдистые, плотные. Встречается растительный детрит. Аргиллиты темно-серые и черные, слюдистые, тонко отмученные.

Изучаемые отложения вскрыты несколькими скважинами в пределах действующего месторождения, при этом в некоторых из них из ачимовского интервала производился отбор керна, что позволяет более детально изучить исследуемый объект. В рамках настоящего исследования использовались данные о каменном материале по восьми скважинам. Скважины являются вертикальными (кроме скв. 6 – наклонно-направленная скважина), вскрывающими баженовскую свиту; таким образом, все скважины описывают полный разрез ачимовских отложений.

Ниже приведено краткое описание отложений вскрытого скважинами разреза по результатам детальной литолого-петрографической характеристики имеющегося кернового материала, отмечены основные особенности отложений ачимовского комплекса, указывающие на обстановки их формирования (таблица 1).

Ачимовский интервал литологически имеет неоднородное строение, обусловленное сложным переслаиванием массивных и градационных песчаников с градационными алевролитами и аргиллитами, а также массивными песчаными алевролитами, с глинистыми интракластами. Строение пласта осложнено также развитием песчано-алевролитовых прослоев, с карбонатным цементом.

В разрезе скважин 3 и 4 по результатам изучения текстурных особенностей пород выявлено значительное сходство их строения с существующими стандартными текстурными схемами, предложенными для песчаных и тонкозернистых турбидитов (последовательность Боума – идеализированная последовательность изменения состава и текстурных особенностей полного разреза турбидита, отражающая его стадийность формирования). Подошва песчаных и алевролитовых слоев обычно достаточно резкая. Кровля имеет в различной степени градационное строение, связанное с постепенным утонением вверх по слою гранулометрического состава пород. Маломощные прослои песчаников, залегающие среди алевролитов и аргиллитов, имеют градационное строение и характеризуются стандартным текстурным набором последовательности Боума. Для массивных песчаников характерно присутствие глинистых интракластов, ориентированных обычно длинными осями параллельно подошве и кровле слоев, часть интракластов несет следы пластической деформации, в некоторых наблюдается первичная слоистость (хвостовая часть турбидитного потока). Для большинства песчано-алевролитовых прослоев характерна резко выраженная кровля, которая может перекрываться тонким слоем микрокослойчатого и/или горизонтальнослойчатого алевролита. Отдельные слои песчаника обычно представляют два – три слоя последовательности Боума.

В приподошвенной части слоев иногда встречаются конседиментационные трещинки, по которым происходило смещение слоев.

В песчано-алевролитовых породах нечеткие намывы углисто-слюдистого и углисто-глинистого материала подчеркивают мелкую косую и горизонтальную слойчатость, пологонаклонную параллельную, конволютную, пологоволнистую слоистость, иногда флазерную слоистость. Встречаются текстуры внедрения и отчетливые знаки нагрузки.

В связи со всем вышесказанным можно сделать вывод, что по комплексу текстурных и структурных характеристик изученные отложения ачимовской толщи связаны с гравитационными осадочными потоками в пределах нижней части подводного склона и его подножья.

Литологически породы-коллекторы представлены мелкозернистыми песчаниками и мелко-крупнозернистыми алевролитами с визуальными признаками нефтенасыщения (буроватый оттенок, запах нефти). Неколлектора представлены песчаниками и алевролитами, с карбонатным цементом, глинистыми алевролитами и аргиллитами.

По минералогическому составу песчаники и алевролиты рассматриваемого пласта относятся к полимиктовым, преимущественно аркозовым и граувакковым, с содержанием обломков пород от 13 до 50%. В составе пород значительно преобладают полевые шпаты – от 41 до 55-60%. Содержание кварца составляет 15-40%, слюды от 5-7 до 10-15%.

Терригенный материал обычно отсортирован в средней или очень плохой степени, зерна полуокатанные, полуугловатые, неокатанные с неровными, иногда рваными ограничениями.

Цемент развит неравномерно, пленочного и пленочно-порового типа, глинистый, иногда встречается примесь карбоната. Количество цемента определяется от 5-7 до 10-15%. Основной минерал глинистого цемента – хлорит. Пленки цемента неравномерные по толщине и протяженности, развиваются как по периметру зерен, так и по контурам пор.

Поры обычно остаются свободными, наблюдаются редкие спорадические участки, где группа пор или единичная пора выполнены кальцитом. Свободные поры, как правило, алевролитовой размерности, замкнутые или слабо сообщающиеся друг с другом, составляют, включая вторичные, 5-7 %, реже 8-9 % площади шлифа.

Характерные особенности пород ачимовской толщи в керновом материале скважин

№ скважины	Текстурные особенности пород	Характерный объект
1	Наличие конгломератов (глинистых интракластов) хаотично ориентированных (рис. 3).	Канал, по которому происходила транспортировка осадочного материала
3	Отчетливая градационная слоистость – классический цикл Боума (рис. 4), текстуры деформации (оползания) (рис. 3).	Наличие конуса выноса в исследуемом интервале, связанного с действием турбидитных потоков
4	Отчетливая градационная слоистость – классический цикл Боума (рис. 4), многочисленные не отсортированные по форме и размеру интракласты аргиллитов (рис. 5).	Наличие конуса выноса в исследуемом интервале, связанного с действием турбидитных потоков
5	Для массивных песчаников характерно присутствие линейно ориентированных глинистых интракластов одиночных или сгруженных в горизонты (рис. 5). В подошве песчаников наблюдаются мелкие знаки внедрения (рис. 6).	Канал, по которому происходила транспортировка осадочного материала

6	Многочисленные не отсортированные по форме и размеру интракласты аргиллитов (рис. 6, 7).	Канал, по которому происходила транспортировка осадочного материала
7	Аргиллит темно-серый, почти черный, алевритистый, слюдистый, сланцеватый, хрупкий, участками разбитый на куски, местами слабо известковистый, в некоторых интервалах отмечаются прослой глинисто-карбонатной породы серого цвета, плотный, крепкий (рис. 8).	Вмещающая порода, глубоководного генезиса
8	Наличие внутриформационного конгломерата от светло-серого до серого, сложенного галькой различной размерности, выполненной аргиллитом (рис. 9).	Канал, по которому происходила транспортировка осадочного материала

По фильтрационно-емкостным свойствам породы ачимовского комплекса относятся к коллекторам VI, V и IV классов по Ханину А.А., с проницаемостью, соответственно, 0,01 – 0,06 мД, 1,8 – 6,2 мД и 15мД. Пористость (открытая, по воде) определяется в пределах 1,5-19,7%.

Таким образом, песчаники и алевролиты пласта обладают невысокими коллекторскими свойствами, поскольку:

- 1) породы обычно недостаточно хорошо отсортированы;
- 2) имеется мало свободных пор, особенно сообщающихся друг с другом;

3) наблюдается довольно много слюды, часть её заполняет межзерновое пространство и выполняет функции цемента, что сокращает количество свободных пор.

Однако, несмотря на ухудшенные фильтрационно-емкостные свойства, наблюдаемые повсеместно признаки нефтенасыщенности (резкий запах УВ, свечение в УВ, маслянистые выделения, буроватый оттенок) свидетельствуют о перспективности ачимовских отложений.

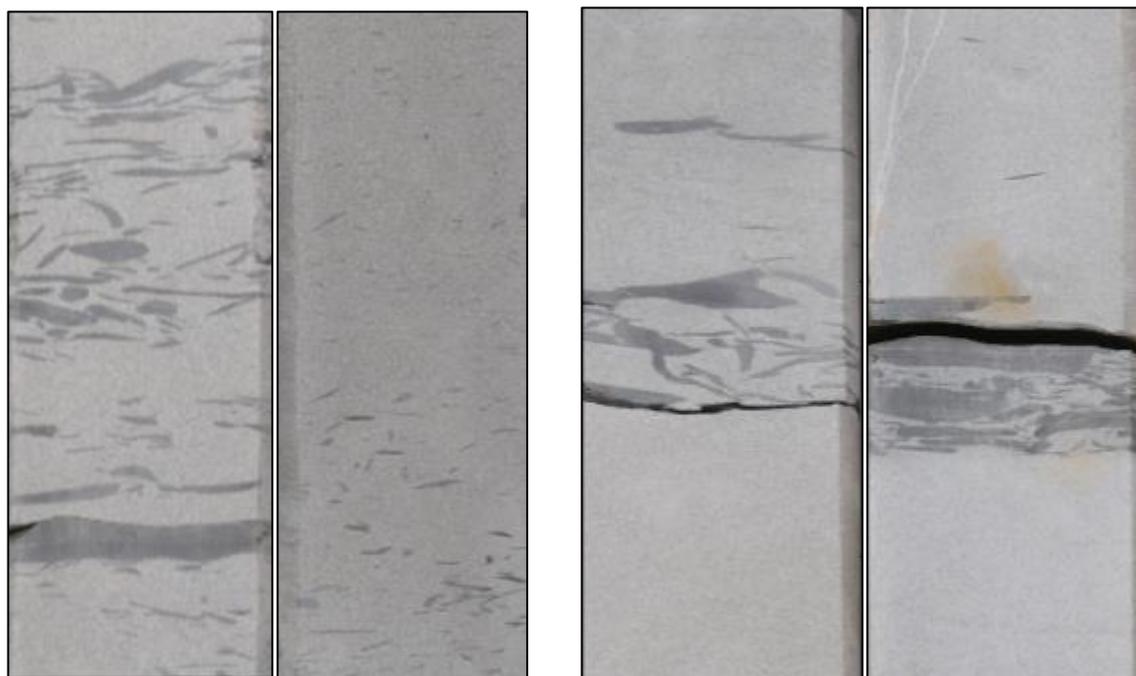


Рис. 3 Пример конгломератов (глинистые интракласты) в интервале ачимовских отложений в скважине 1 (слева) и 3 (справа). Размер образцов 30 см.

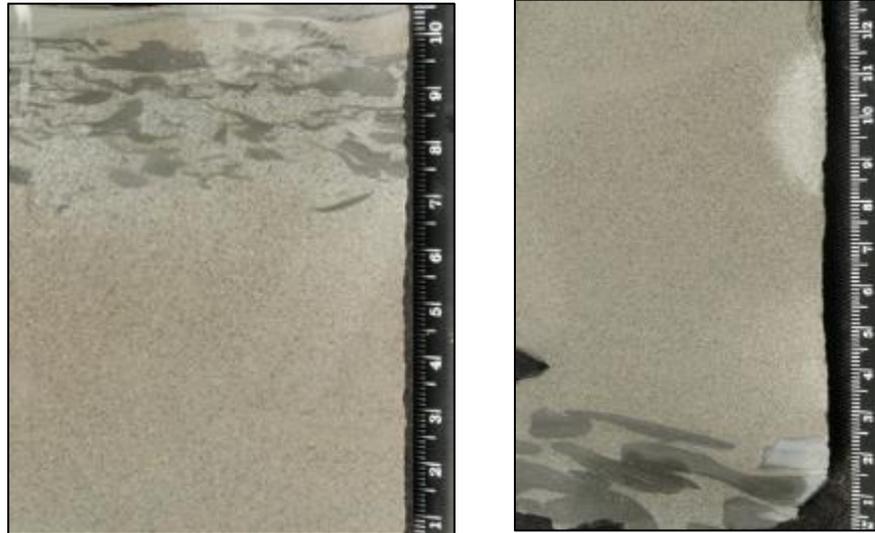


Рис. 4 Примеры градиционной слоистости (последовательность Боума) в разрезе скважин 3 и 4. Размер образцов 10 см.

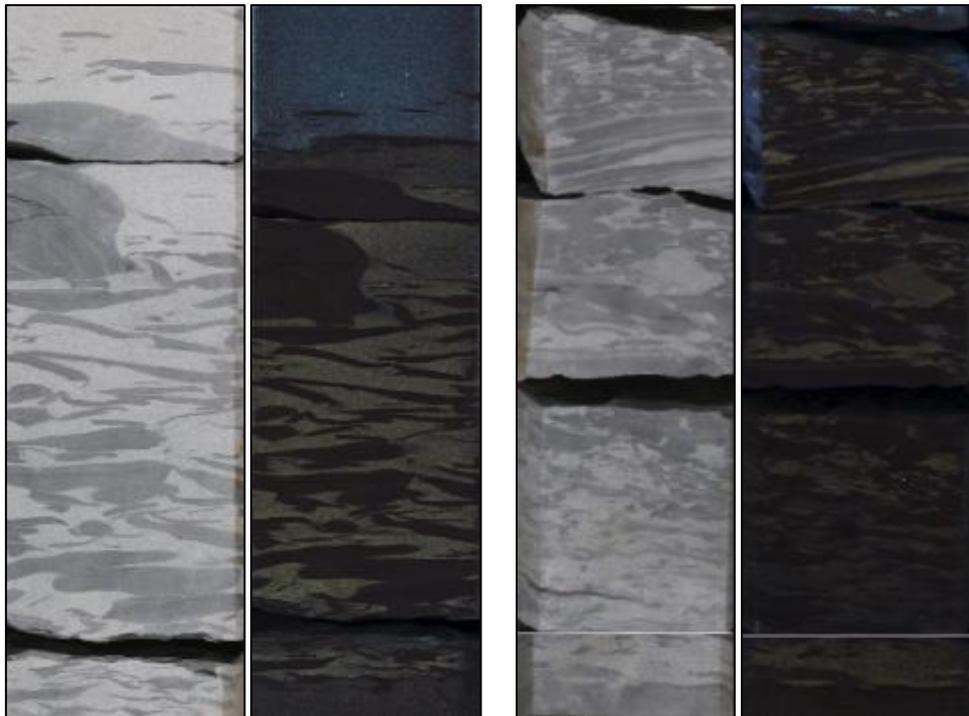


Рис. 5 Пример конгломератов (глинистые интракласты) в интервале ачимосвких отложений в скважине 4 (слева) и 8 (справа). Размер образцов 30 см.

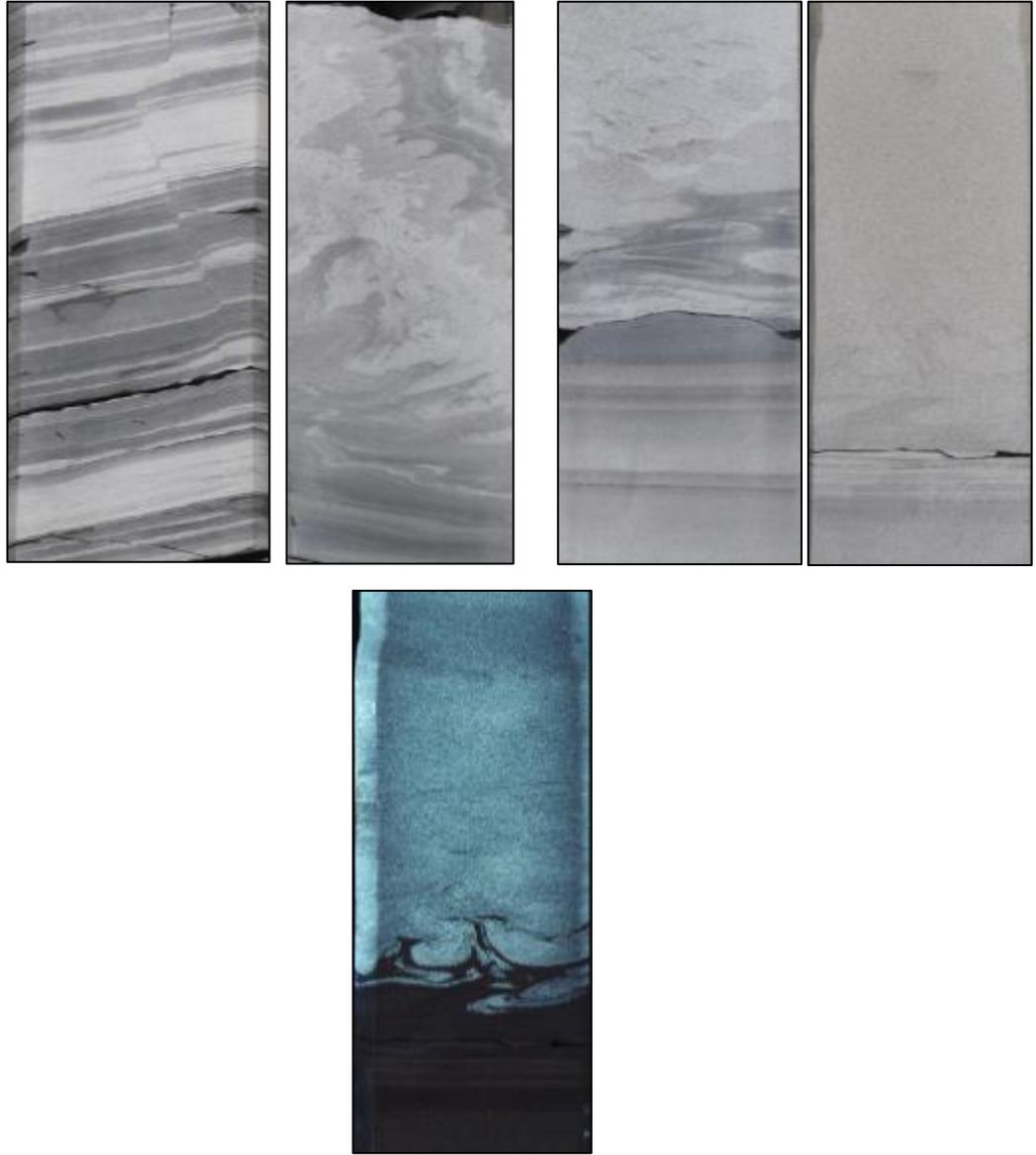


Рис. 6 Примеры текстур взмучивания и оползания, текстуры деформации в интревале ачимовских отложений в разрезе скважин 6 и 5. Размер образцов 20 см.

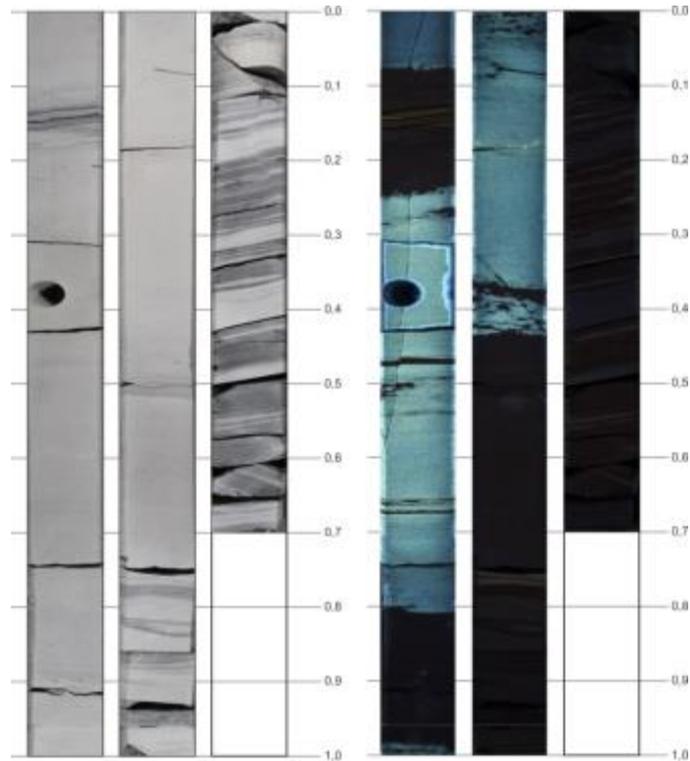


Рис. 7 Характерный разрез ачимовской толщи в стволе скважины 6. Длина вертикальной оси – 1 метр.

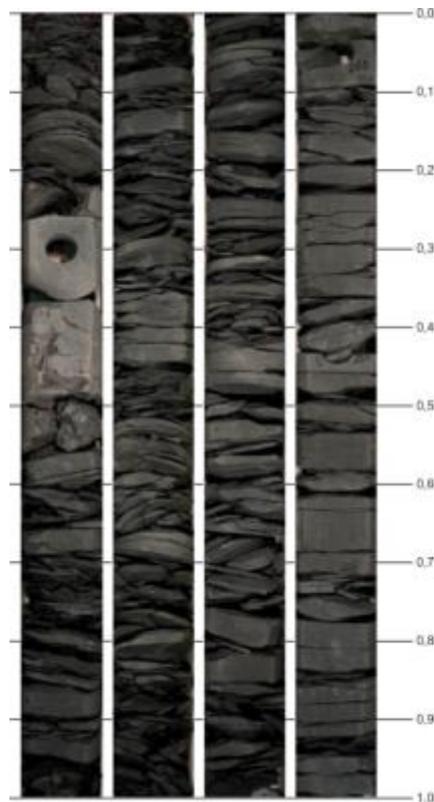


Рис. 8 Характерный разрез ачимовской толщи в стволе скважины 7. Длина вертикальной оси – 1 метр.

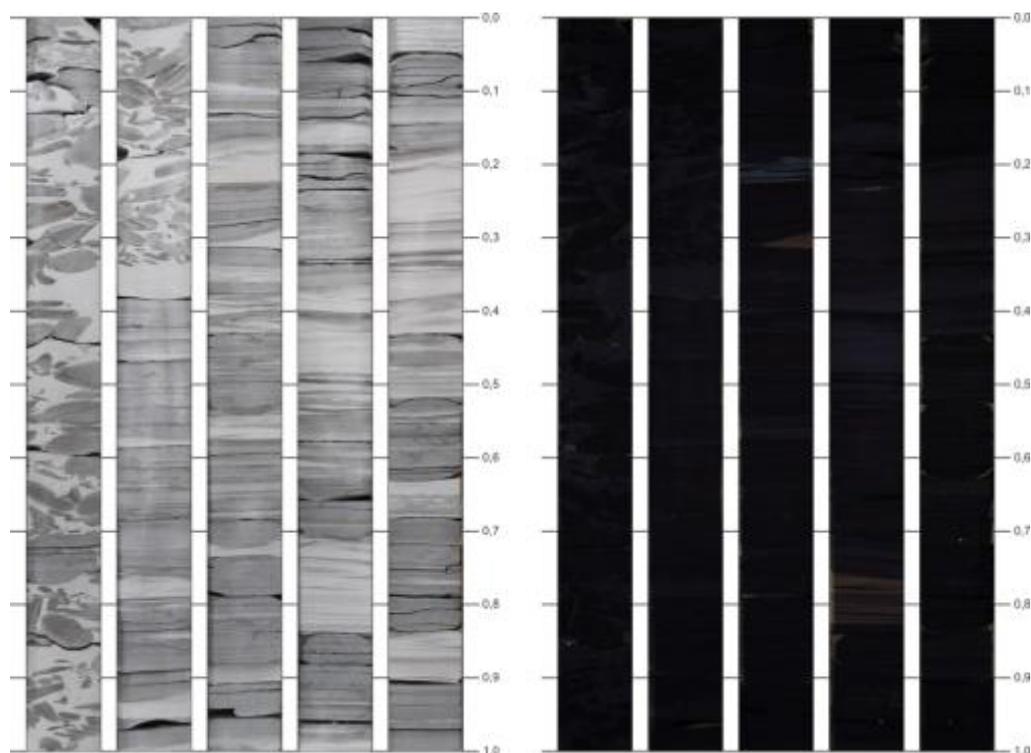


Рис. 9 Характерный разрез ачимовской толщи в скважине 8. Наличие конгломератов указывает на действие течений. Длина вертикальной оси – 1 метр.

В результате анализа каменного материала по скважинам можно сделать вывод, что на изучаемой территории породы ачимовской толщи представлены характерными отложениями турбидитных и оползневых потоков. Во многих скважинах наблюдается наличие конгломератов (участков с интракластами аргиллитов), что указывает на действие подводных каналов (скважины 1, 3, 4, 6, 8). Наиболее мощный разрез конгломератов вскрыт скважиной 8.

Разрез скважины 7 представлен в основном аргиллитом, что указывает на ее положение в некоторой отдаленности от областей лавинной седиментации.

Различие разрезов двух близкорасположенных скважин 6 и 7 указывает на резкую смену обстановок седиментации по площади, что является характерной чертой строения ачимовских отложений.

Нефтяное насыщение ачимовского интервала разреза по всем рассмотренным скважинам (кроме скважины 7), подтверждает перспективность отложений с точки зрения разработки. Основными продуктивными телами являются выявленные подводные каналы (области транспортировки осадочного

материала) и конусы выноса турбидитовых потоков (зоны разгрузки осадочного материала).

1.3 Сейсмогеологическая характеристика ачимовской толщи

Изучение сейсмогеологической характеристики осадочного комплекса включает выделение особенностей волнового поля, отражающих основные черты геологического строения, а также выявление параметров поля, отражающих распространение пород-коллекторов. Для формирования сейсмогеологической характеристики необходимо решение нескольких задач:

1. Привязка данных ГИС к волновому полю и определение выраженности целевого комплекса в волновом поле, а также пластов, соответствующих коллекторам;
2. Проведение палеогеографического анализа, который помогает составить концептуальную модель пласта;
3. Оценка распределения динамических характеристик отраженной волны в целевом интервале.

1.3.1 Привязка данных геофизических исследований скважин к волновому полю

Для изучения ачимовского комплекса отложений были использованы сейсмические данные МОГТ 3D на площади 1000 км². Обработка сейсмических данных выполнялась в 2009 г. по расширенному графу с применением глубинной миграции до суммирования, с сохранением и восстановлением истинного соотношения амплитуд. Качество волнового поля можно оценить как

удовлетворительное, спектральный состав сейсмической записи находится в интервале 10-70 Гц, с доминантной частотой около 30 Гц, что обеспечивает вертикальную разрешающую способность порядка 20 м.

Совместный анализ данных сейсморазведки и ГИС позволяет стратифицировать волновое поле, т.е. выделить рефлекторы, отражающие внутреннюю структуру пласта, а также изучить особенности отображения коллекторов на сейсмических разрезах. Для анализа были использованы данные ГИС, представленные графиками акустического каротажа (АК), плотностного каротажа (ГГКп), гамма каротажа (ГК) и каротажа спонтанной поляризации (СП) по скважинам, в которых был изучен каменный материал. Указанные методы входят в расширенный комплекс ГИС, проводимый на разрабатываемых месторождениях, позволяющий определить внутреннюю структуру пласта на стадии интерпретации сейсмических данных.

Привязка данных ГИС к волновому полю заключается в получении вертикального годографа – графика зависимости времени двойного пробега от глубины. Этот этап необходим ввиду разных вертикальных масштабов: наблюдения ГИС представлены в масштабе глубин, волновое поле – в масштабе времен. Увязка данных заключается в сопоставлении реальной сейсмической трассы с синтетической трассой, рассчитанной по данным ГИС. Для получения синтетической трассы вычисляется график акустической жесткости путем перемножения кривых АК и ГГКп. Наличие кривой акустического импеданса (AI) позволяет рассчитать трассу коэффициентов отражения (R_p):

$$R_p = \frac{AI_{i+1} - AI_i}{AI_{i+1} + AI_i}$$

Для получения синтетической сейсмической трассы производится свертка трассы коэффициентов отражения с сигналом, моделирующим сигнал источника упругих волн. На первом этапе в качестве сигнала используется аналитический вейвлет, однако использование математических вейвлетов не позволяет оценить фазовую составляющую. Поэтому после выполнения первой итерации привязки данных ГИС к волновому полю производится оценка сигнала по скважинным

данным с учетом волнового поля. В рамках оценки сигнала по скважине производится подбор амплитудного и фазового спектра сигнала. Определение фазового и амплитудно-частотного спектра сигнала выполняется путем решения задачи поиска минимума функционала невязки между расчетной и реальной трассами.

Таким образом, процесс привязки является итеративным и характеризуется постепенным повышением коэффициента корреляции между синтетической и реальной трассами.

В таблице 2 представлены коэффициенты корреляции между синтетической и реальной трассой по рассматриваемым скважинам (рис. 10-12).

Таблица 2

Коэффициенты корреляции ($R_{кор}$) реальной и синтетической трасс по результатам увязки

№ скважины	1	3	4	5	6
$R_{кор}$	0.77	0.75	0.57	0.55	0.62

На рис 10-12 представлены результаты привязки данных ГИС по некоторым скважинам к волновому полю.

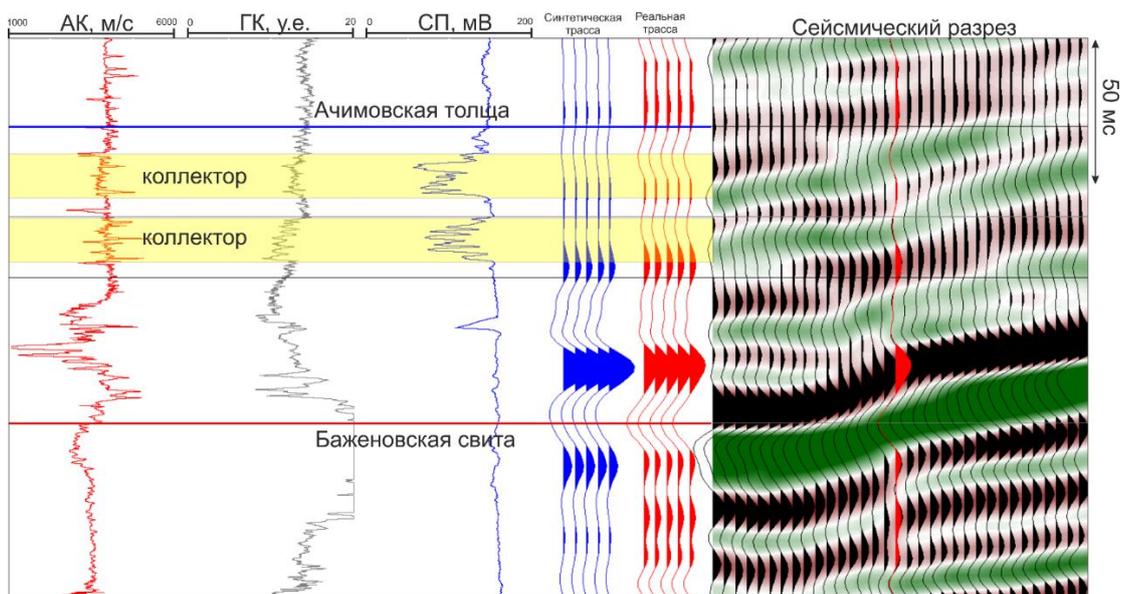


Рис. 10 Результат привязки скважины 1 к волновому полю

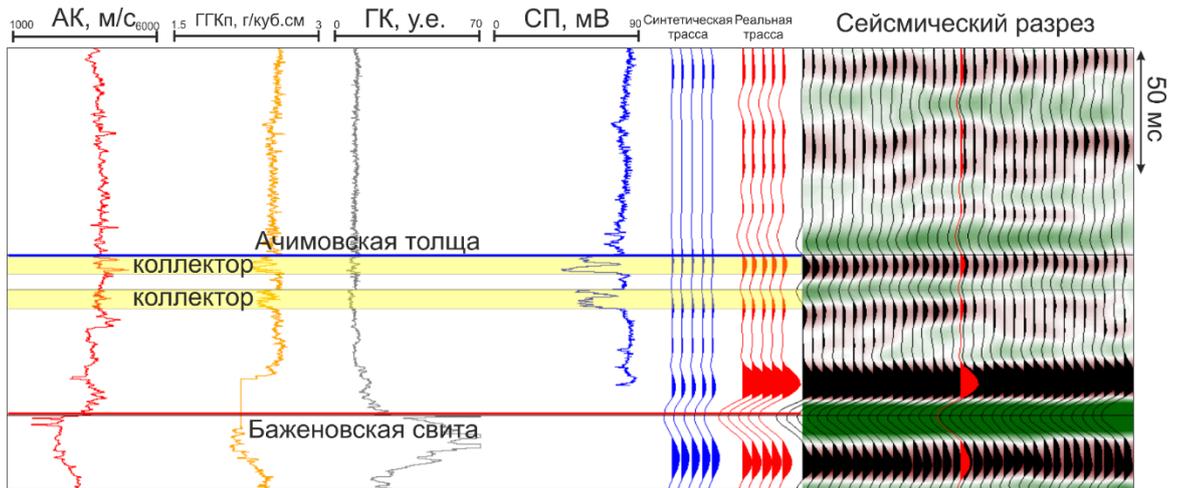


Рис. 11 Результат привязки скважины 3 к волновому полю

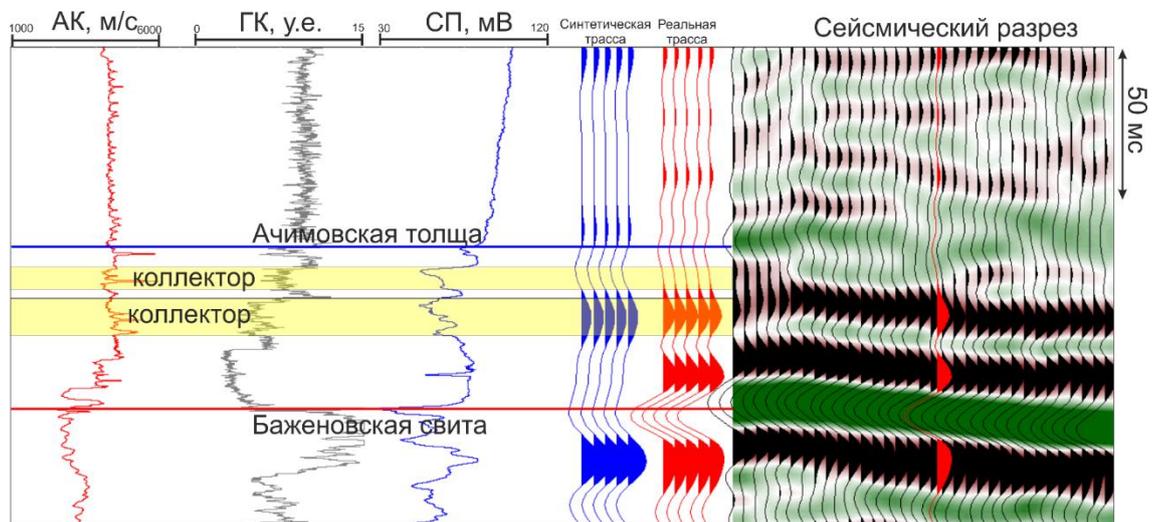


Рис. 12 Результат привязки скважины 4 к волновому полю

По результатам привязки скважинной информации к волновому полю можно сказать, что кровля ачимовского комплекса отложений не характеризуется выдержанным по фазе отражением, местами рефlector характеризуется интерференционной волновой картиной.

Анализ графиков ГИС позволяет установить наличие коллекторов по кривым СП, ГК и ГГКп, при этом наличие коллектора практически не влияет на скорость распространения продольных волн.

Коллектор представлен невыдержанными пластами песчаников, мощность которых изменяется от 1 до 10-15 метров; песчаникам на кривых ГИС отвечает отрицательная аномалия спонтанной поляризации на графиках СП, пониженное

значение радиоактивности и уменьшение плотности по кривой ГГКп. Подобное распределение свойств говорит об уменьшении акустической жесткости на кровле коллектора и увеличение на его подошве. Небольшая мощность пластов не позволяет зарегистрировать отдельные отражения от кровли и подошвы, поэтому отражения носят интерференционный характер.

1.3.2 Палеогеографический анализ

Наличие увязанных данных ГИС и сейсмического разреза делает возможным стратификацию волнового поля, т.е. выделение кровли и подошвы целевого пласта.

Кровля ачимовского комплекса характеризуется невыдержанным по площади отражением, поэтому на сейсмическом разрезе в качестве кровли была принята огибающая клиноформенного комплекса, к которому приурочена изучаемая ачимовская толща. По результатам интерпретации волнового поля можно сказать о двух разных типах разреза: в южной части площади отражение является конформным баженовской свите – данный участок соответствует палеошельфу; северная часть площади представлена наклонными рефлекторами, падающими в северо-западном направлении, ее можно рассматривать как клиноформную, включающую в себя склоновую и подножную части.

Подошве ачимовской толщи соответствуют баженовские аргиллито-глинистые отложения, являющиеся реперным отражением на территории Западной Сибири.

Выделение кровли и подошвы комплекса на площади сейсмических работ позволяет использовать методику палеогеографического анализа. Данный тип анализа волнового поля заключается в построении карты изопахит – временных толщин комплекса. Карту временных толщин можно также рассматривать как

карту палеорельефа на момент окончания формирования, изучаемого клиноциклита. Карта изопахит изучаемого клиноциклита показана на рис. 13.

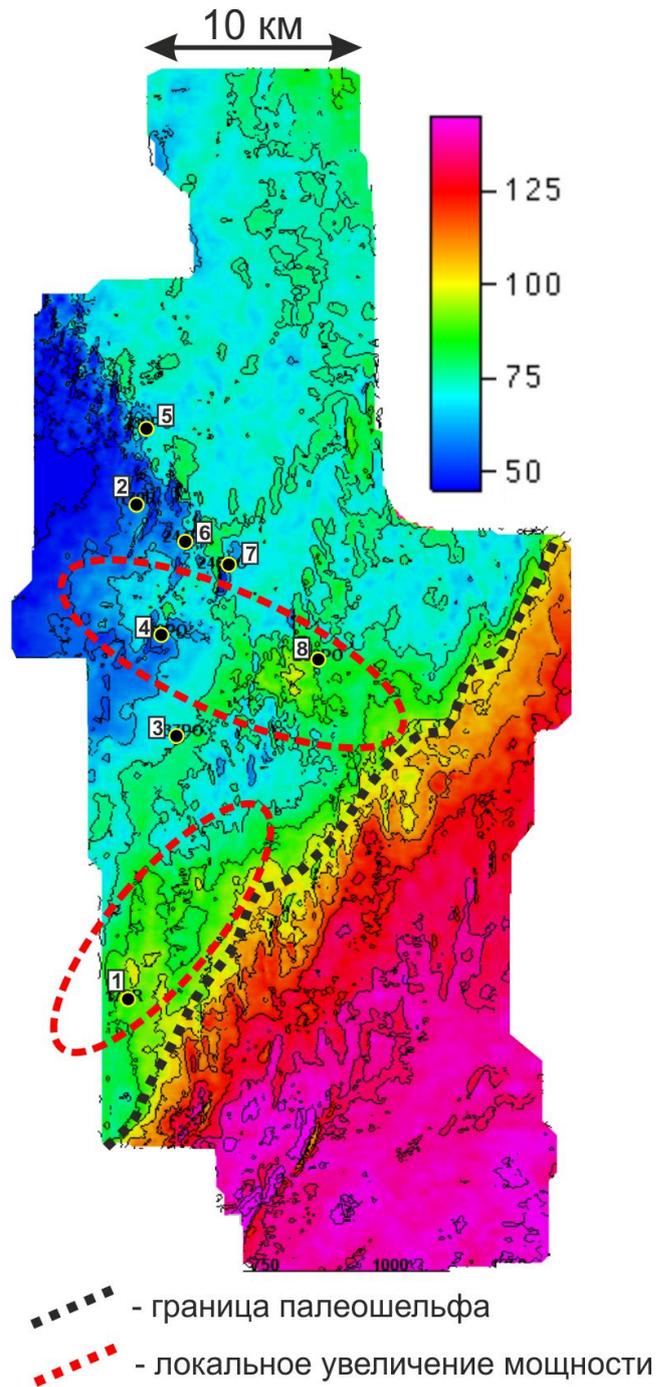


Рис. 13 Карта изопахит изучаемого клиноциклита. Максимальными толщинами характеризуется шельфовая часть комплекса. Область сгущения изолиний соответствует склоновой части. Минимальные толщины отвечают относительно более глубоководной части комплекса.

Временные толщины изучаемого пласта варьируют в пределах 40-150 мс, по характеру распределения толщин фиксируется выклинивание в северо-западном направлении. Анализ распределения мощностей внутри клиноциклита позволяет разделить пласт на три фациальных обстановки: шельфовая, склоновая и глубоководная.

Шельфовая часть пласта приурочена к юго-восточной области изучаемого района. Данная зона характеризуется максимальными толщинами, при этом мощность выдержана внутри шельфовой обстановки. Изменение толщин наблюдается только в зонах тектонической деформации.

Склоновая часть пласта характеризуется максимальным градиентом поверхности, что отражает увеличение угла падения пласта.

Глубоководная часть представляет собой относительно пологое подножие шельфовой террасы. Данная область характеризуется минимальными толщинами комплекса, однако мощности меняются плавно, отражая выклинивание циклита в северо-западном направлении. Малая мощность связана с медленной седиментацией осадочного материала ввиду максимального удаления от источника сноса.

Представленная градация отражает полное строение клиноциклита, включающее в себя весь спектр фациальных обстановок, характерных для неокомского разреза.

Наибольший интерес в структуре карты изопакит представляют области локального увеличения мощности пласта внутри абиссальной зоны, наблюдаемые в южной и центральной части месторождения. Данные утолщения могут отражать локальное увеличение поступления осадочного материала связанное, с действием систем транспортировки и аккумуляции осадка – каналы, конусы выноса мутьевых и оползневых потоков.

В результате выполненного палеогеографического анализа изучаемый пласт был разделен на три блока – шельфовый, склоновый и абиссальный (рис. 14). В рамках абиссального блока выделяются локальные области увеличения толщин, внутри которых расположены пробуренные продуктивные скважины. Таким

образом, можно построить концептуальную фациальную карту, отражающую основные области внутри целевого комплекса. Совместный анализ фациальной карты с результатами исследования керна подтверждает наличие областей транспортировки и аккумуляции осадочного материала. Глубоководная часть пласта вне локальных поднятий, основываясь на разрезе скважины 7, представлена тонким аргиллитовым материалом, что является характерным для глубоководных отложений. В рамках выделенных локальных утолщений пласта, судя по скважинной информации, распространены как каналы транспортировки осадочного материала, на что указывает наличие конгломератов в разрезе многих скважин, так и конусы выноса мутьевых и оползневых потоков, на что указывает градиционная слоистость и структуры оползания. Скважины, расположенные в пределах локального увеличения мощности, характеризуются наличием коллектора в разрезе, а также нефтяным притоком. Таким образом, построенная фациальная карта позволяет в общих чертах оценить вероятную перспективность клиноциклита, однако выполнение детального прогноза по полученным данным невозможно. Так, например, скважина 3 характеризуется наличием каналов, судя по конгломератам в разрезе скважины, но в данной области не наблюдается значительных увеличений мощности пласта. Указанный факт демонстрирует региональный масштаб подобного анализа.

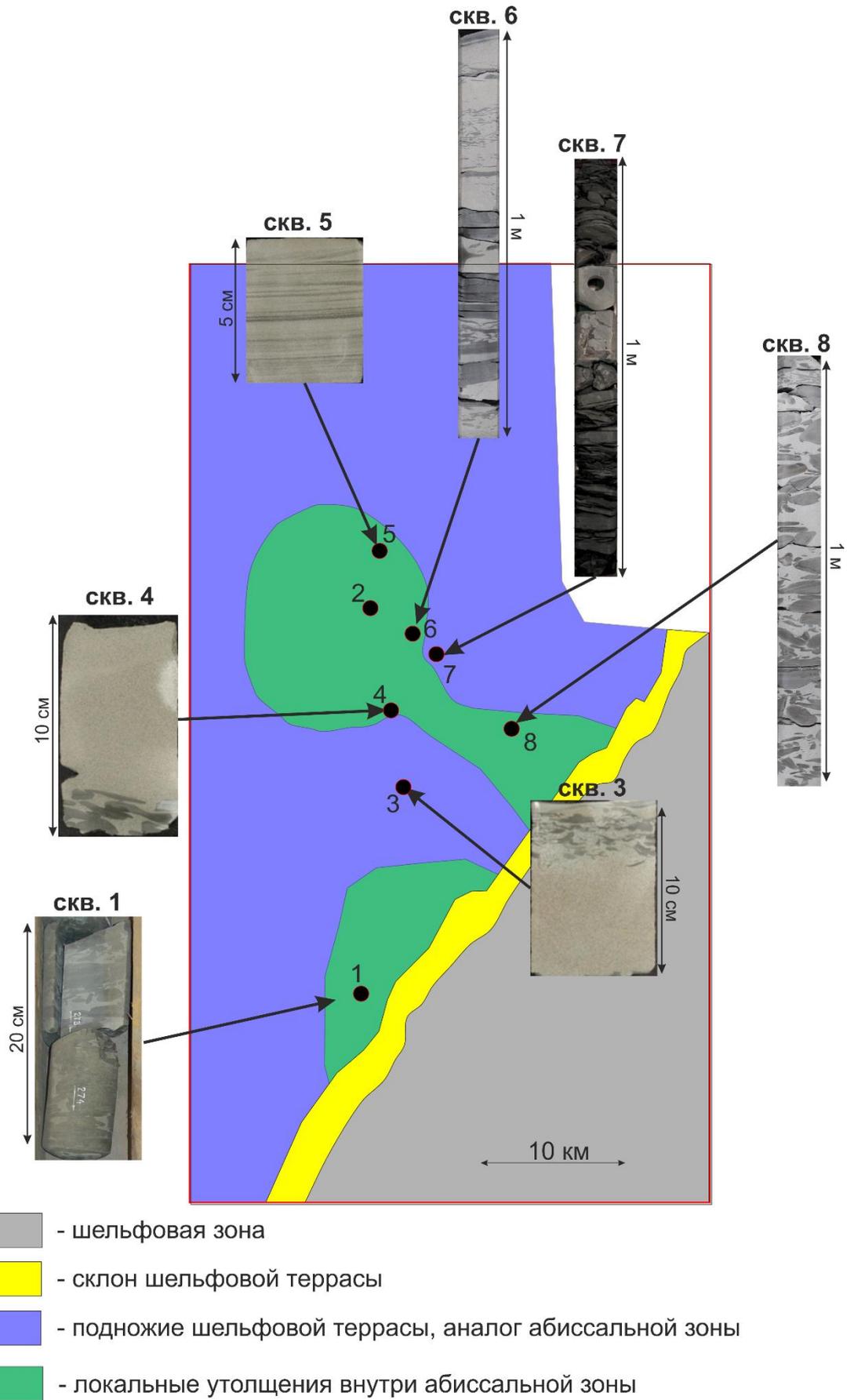


Рис. 14 Концептуальная фациальная карта изучаемого пласта

Для более детального представления внутреннего строения продуктивного пласта целесообразно использование динамических характеристик сейсмических данных, которые позволяют оценить распределение упругих свойств внутри пласта, а также связать их с фильтрационно-емкостными свойствами.

1.3.3 Анализ волнового поля

Анализ волнового поля заключается в изучении распределения амплитуд рефлектора по площади.

Анализ данных ГИС по скважинам (АК и ГГКп), позволяет сделать вывод, что на границе ачимовской толщи, где наблюдается наличие коллектора, происходит уменьшение значений кривых плотностного каротажа, при этом значения скорости меняются не так резко (рис. 15). Резкое уменьшение плотности приводит к уменьшению акустической жесткости на кровле коллектора и её увеличению на подошве. Подобное распределение упругих свойств приводит к образованию отрицательного по знаку отражения от кровли и положительного от подошвы. Значение амплитуд зависит от соотношения акустических жесткостей покрывающих глин и коллектора.

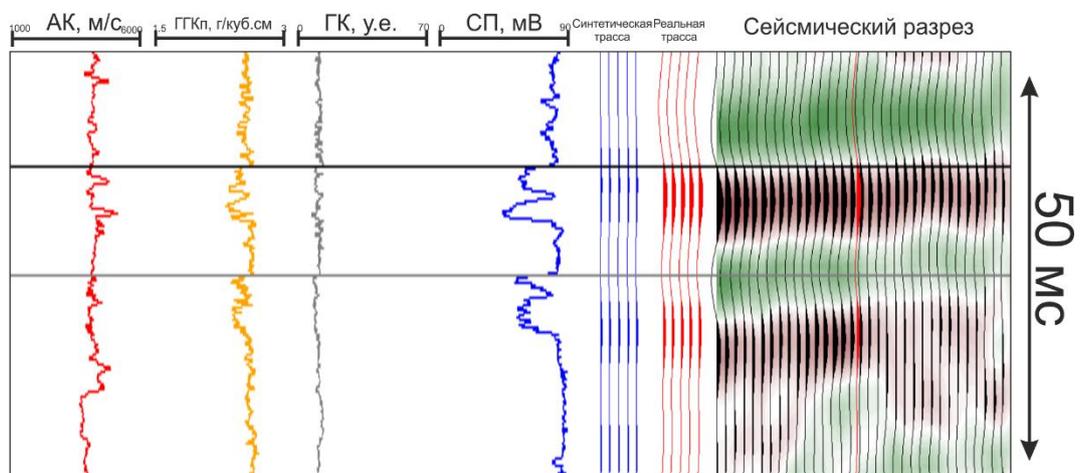


Рис. 15 Результат привязки скважины 3 к волновому полю

Другим фактором, влияющим на амплитуду отражения, является интерференция сейсмических сигналов от кровли и подошвы коллектора. При достаточно большой мощности пласта временная задержка отражений от кровли и подошвы позволяет получить индивидуальные экстремумы фазы на волновом поле. Однако при уменьшении мощности рассматриваемого пласта-коллектора наступает интерференция сигналов, что приводит к изменению формы и амплитуды отражения.

Отражение от кровли зависит как от соотношения акустических жесткостей пластов выше и ниже границы, так и от мощности коллектора. Оба этих фактора будут обуславливать наличие изменений амплитуды отражения по площади. Для оценки вероятных областей распространения коллекторов внутри ачимовской толщи был рассчитан срез амплитуд вдоль рефлектора (рис. 16).

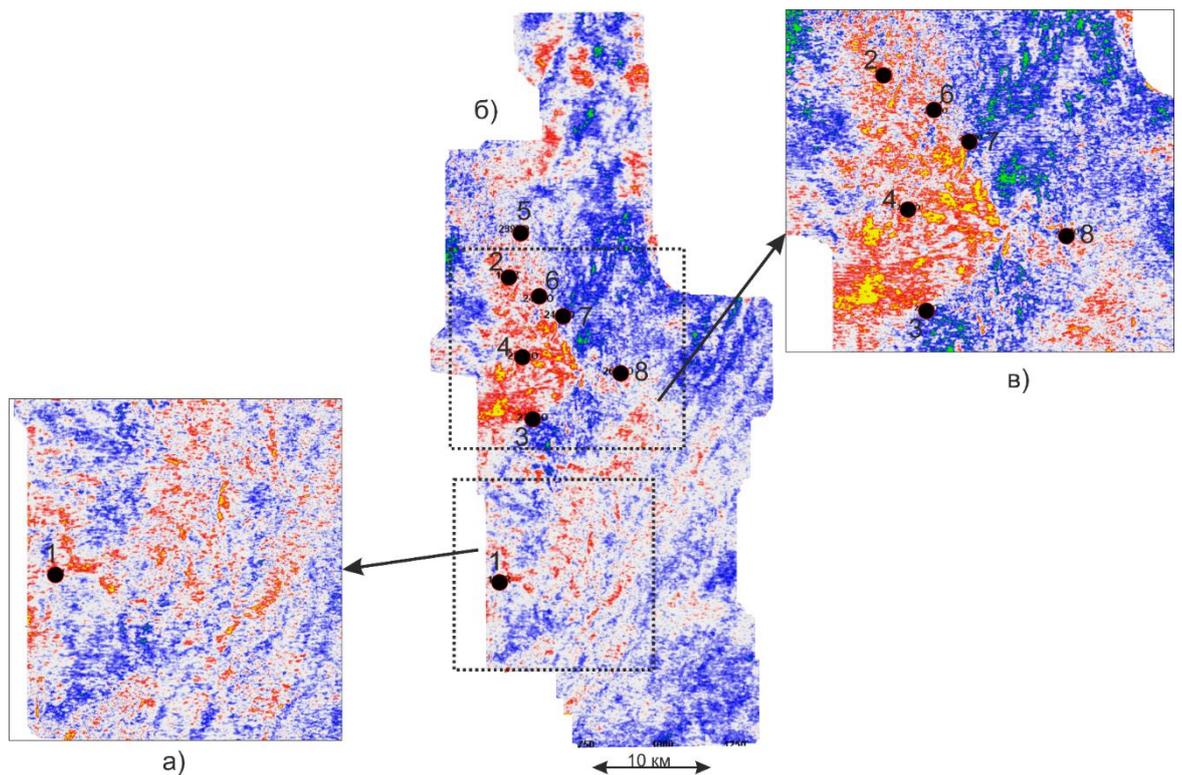


Рис. 16 Карта распределения амплитуд вдоль рефлектора (минимальные значения – желто-красный цветочкод, максимальные - синий): а) южная зона увеличенных толщин; б) общая карта изучаемой территории; в) аномальная область, отвечающая локальному увеличению толщины комплекса.

Анализируя карту амплитуд вдоль рефлектора можно выделить область аномальных значений амплитуды (желтый цвет на карте), которая в плане совпадает с выделенной ранее областью локального увеличения мощностей в абиссальной части пласта. При детальном анализе аномальной зоны можно выделить линейно вытянутые тела, которые могут соответствовать каналам транспортировки осадочного материала.

Южная область увеличенных толщин пласта характеризуется хаотичным распределением амплитуд отражения. Несмотря на то, что в скважине 1 фиксируется наличие каналов, по волновому полю установить их наличие не представляется возможным.

Граница палеошельфой террасы на карте амплитуд выделяется достаточно уверенно в виде серии линейных аномалий СВ-ЮЗ простирания.

Помимо стандартного амплитудного анализа была выполнена акустическая инверсия волнового поля ввиду того, что по скважинным данным коллектор выделяется по пониженным значениям плотностного каротажа. Выбор именно акустического типа инверсии продиктован в первую очередь ограниченностью входных данных: для использования более сложных инверсионных алгоритмов требуется наличие качественных сейсмических записей до суммирования, а также информация о скорости распространения поперечных волн.

Выполнение акустической инверсии предусматривает использование низкочастотной геоакустической модели, которая является результатом интерполяции скважинной информации об акустической жесткости с учетом геометрии отражающих горизонтов. В модели были использованы все имеющиеся скважины, характеризующиеся наличием данных АК и ГГКп, согласованность данных по площади позволила получить качественную низкочастотную модель. Требование низкочастотного характера модели достигается применением фильтра высокой частоты с граничным значением 10-15 Гц. Решение задачи инверсии носит итеративный характер, производится многократное решение прямой задачи, то есть расчет синтетического волнового поля. При этом производится изменение акустических параметров модели с целью минимизации невязки между

наблюденным и расчетным волновым полем. Модель, удовлетворяющая условию минимума функционала невязки, отвечает результирующему кубу акустической жесткости.

В результате применения акустической инверсии был получен куб импеданса для центральной области, где наблюдается развитие основного конуса выноса. В поле акустического импеданса целевой конус выноса выделяется в пониженных значениях волнового сопротивления, однако детальность карты в целом сопоставима с результатом применения стандартного амплитудного анализа (рис. 17). В данном случае подобная информация, безусловно, может использоваться для пространственной локализации продуктивного интервала, однако определение внутреннего строения конуса выноса не представляется возможным.

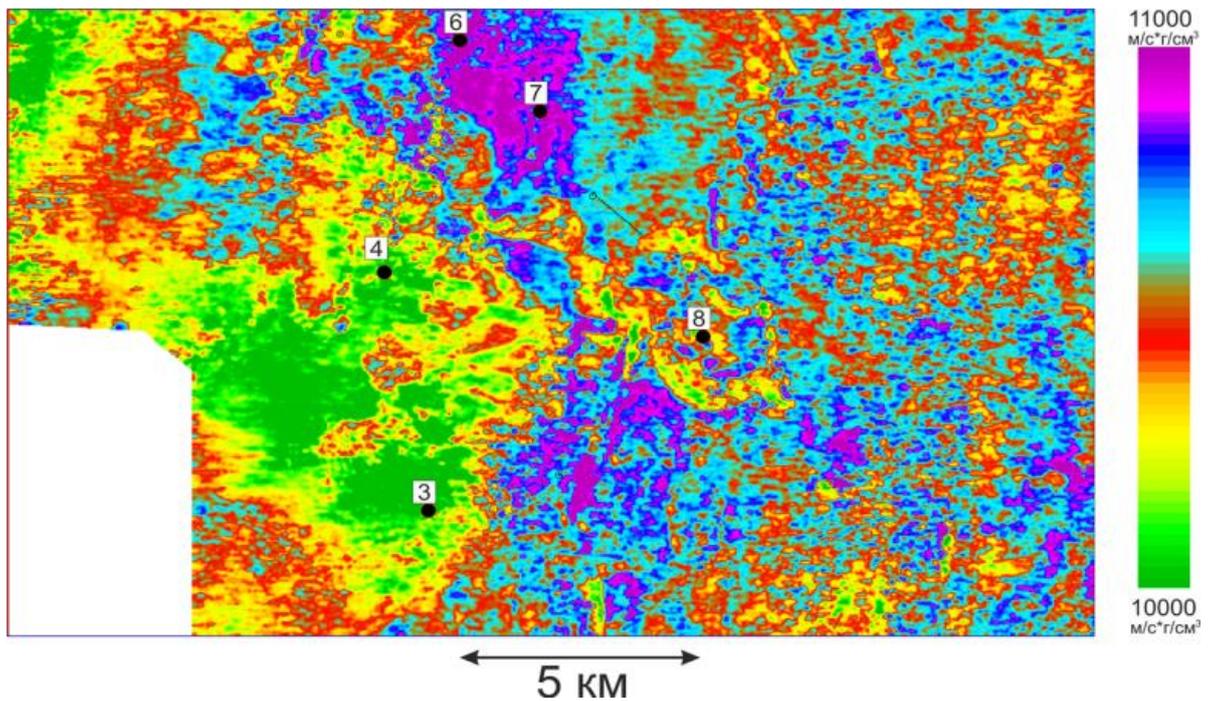


Рис. 17 Карта значений акустического импеданса ачимовского пласта в центральной части площади.

В целом карты амплитуд и стандартных атрибутов характеризуются недостаточной информативностью, что связано с преобладанием шумовой компоненты и слабой разрешающей способностью волнового поля в областях интерференции. Исходя из низкой информативности карт амплитуд и стандартных

атрибутов, волновое поле не может быть использовано для детального прогноза геологической обстановки.

Отрицательный результат использования стандартный алгоритмов анализа волнового поля для прогноза строения ачимовской толщи требует усовершенствования методик и применения новых технологий динамической интерпретации данных сейсморазведки. Одной из таких технологий является спектральная декомпозиция волнового поля, т.е. разложение поля на частотные составляющие и последующий анализ отдельных гармоник. Основное преимущество заключается в том, что, во-первых, анализ гармоник поля позволяет изучить его на разных масштабах, а, во-вторых, интерференция сигналов положительно сказывается на результатах спектральной декомпозиции, обуславливая появление характерных аномалий. Таким образом, интерференция переходит в рамках метода спектральной декомпозиции из класса помехи, в класс положительных эффектов.

Глава 2. Спектральная декомпозиция волнового поля

Под спектральной декомпозицией волнового поля понимается разложение сейсмического сигнала на спектральные, то есть частотные, составляющие. Волновое поле может быть рассмотрено как суперпозиция разночастотных компонент, которые не являются стационарными, а меняются вдоль сейсмической трассы, отражая влияние геологической среды на спектральный состав сейсмической записи. В основе спектральной декомпозиции лежит предположение о том, что локальное изучение спектра волнового поля позволяет получить больше информации о внутреннем строении геологических объектов.

Применение спектральной декомпозиции получило значительный импульс в развитии в конце XX столетия. В настоящее время в зарубежной научной литературе имеется большое количество публикаций, посвященных спектральному анализу волнового поля. Однако в отечественной геофизике вопрос спектральной декомпозиции и ее применения в области сейсморазведки по сей день освещен недостаточно широко.

В общем случае, методы спектральной декомпозиции могут быть разделены на два класса. Первый класс методов основывается на использовании преобразования Фурье для получения частотных характеристик. Второй класс алгоритмов предусматривает использование метода вейвлет-разложения.

2.1. Преобразование Фурье

Известно, что произвольный временной ряд $S(t)$, для которого выполняется условие (2.1), может быть представлен ортогональной системой функций (2.2), коэффициенты которой определяются из соотношения (2.3):

$$\int_{t_1}^{t_2} [S(t)]^2 dt < \infty \quad (2.1),$$

$$S(t) = C_0 \varphi_0(t) + \dots + C_n \varphi_n(t) + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} C_n \varphi_n(t) \quad (2.2)$$

$$C_n = \frac{1}{|\varphi_n|^2} \int_{t_1}^{t_2} S(t) \varphi_n(t) dt \quad (2.3)$$

где $|\varphi_n|^2 = \int_{t_1}^{t_2} \varphi^2(t) dt$ (2.4) - квадрат нормы, или энергия базисной функции $\varphi_n(t)$.

Произведения вида $C_n \varphi_n(t)$, входящие в ряд (2.2), представляют собой спектральную составляющую сигнала $S(t)$, а совокупность коэффициентов $\{C_0, \dots, C_n, \dots\}$ называют спектром сигнала [14]. В сейсморазведке в рамках спектрального разложения наибольшее распространение получил анализ по базису гармонических функций, традиционно представляющихся в виде комплексных экспонент. Эти базисные функции простираются вдоль всей оси времени, т.е. являются бесконечными гармониками, которые характеризуются собственной частотой, амплитудой и фазой [15].

В результате применения преобразования Фурье к сейсмической трассе производится разложение его на ряд бесконечных гармонических функций. Совокупность амплитудных характеристик гармоник составляет амплитудно-частотный спектр трассы, а совокупность фазовых характеристик – фазово-частотный спектр. Данная операция получила очень широкое распространение в цифровой обработке сигналов, так как позволяет представлять сигнал, заданный во временной области, в виде характеристик, определенных в области частот.

Применение преобразования Фурье для метода спектральной декомпозиции было изучено G. Partyka [42]. Для понимания результатов спектральной декомпозиции необходимо рассмотреть сверточную модель, в рамках которой сейсмическая трасса представляется как результат свертки трассы коэффициентов отражения с неким зондирующим сигналом, отвечающим импульсу источника с наложением фильтрующих свойств среды.

При рассмотрении преобразования Фурье в рамках длительного по времени интервала трассы, на выходе мы получаем оценку зондирующего сигнала. Это явление происходит вследствие того, что в широком окне трасса коэффициентов

отражения и аддитивная помеха являются случайными функциями, поэтому их частотный спектр можно принять за константы. Из этого следует, что единственным влияющим фактором остается только спектр сигнала, поэтому спектральный анализ Фурье в широком окне не описывает информацию о геологическом строении изучаемого разреза.

Если рассмотреть преобразование Фурье в узком окне, то трасса коэффициентов отражения уже не может быть оценена как случайная функция, поэтому у нее будет собственный спектр, отражающий акустические свойства исследуемой среды. Общий спектр трассы будет выражаться как спектр сейсмической трассы коэффициентов отражения с наложенным фильтрующим влиянием спектра сигнала источника. Таким образом, в рамках преобразования Фурье по узкому временному окну выходной спектр несет в себе информацию об акустических свойствах среды, что может быть использовано для прогноза свойств. Этот тезис является основой метода спектральной декомпозиции.

С позиций точного представления сигналов преобразование Фурье имеет ряд ограничений и недостатков. Обладая хорошей локализацией по частоте, оно не обладает временным разрешением, ввиду того, что ядро преобразования Фурье не имеет локализации по времени. Локализация по частоте позволяет анализировать стационарные процессы, однако сейсмический сигнал является нестационарным, то есть его частота меняется со временем, поэтому важной составляющей анализа является способность оценить изменения по времени. При необходимости временной локализации спектральных компонент требуется перейти к частотно-временному представлению сигнала [15].

Решение этой проблемы возможно путем применения оконного преобразования Фурье, которое также называется преобразованием Гэбора [25]:

$$GT(\nu, b, a) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(t) e^{-\frac{(t-b)^2}{a}} e^{-i2\pi\nu t} dt \quad (2.5)$$

В рамках преобразования Гэбора применяется предварительная операция умножения сигнала $S(t)$ на «функцию окна» $w(t-b)$ (где b – сдвиг окна по времени), которая также выражена в экспоненциальном виде. Использование функции окна

позволяет локально изучить спектр сигнала во времени, то есть в разных позициях b , что делает возможным изучение частотных характеристик в динамике. Однако окно преобразования Гэбора является постоянным по времени, что накладывает ограничения на частотную и временную разрешающую способность результатов.

Преобразование Гэбора позволяет увеличить разрешающую способность по времени, однако приводит к ухудшению разрешающей способности по частоте, ввиду принципа неопределенности Гейзенберга [27].

Недостатком оконного преобразования Фурье выступает факт зависимости результатов анализа от выбранного окна анализа. Использование слишком узкого окна позволит получить детализацию по времени, однако сильно сократит разрешающую способность в частотной области. Слишком широкое окно может обеспечить представление низкочастотных компонент, но его ширина будет излишней для гармоник высокой частоты.

Исходя из недостатков преобразования Гэбора, логичным является переход к частотно зависимым окнам анализа, при которых ширина окна изменяется для каждой гармоники в зависимости от ее частоты. Данная методика получила название S-преобразование [46]. Такой подход является переходным к новому классу анализа, получившим название вейвлет-анализ.

2.2. Вейвлет-преобразование

2.2.1 Теория вейвлет-преобразования

Вейвлет-преобразование - это алгоритм цифровой обработки и анализа данных, возникший в конце XX века, что связано с работами таких ученых как Гроссман и Морле [40, 41]. В современной науке метод вейвлет-преобразования получил крайне широкое распространение в самых различных областях.

Согласно определению И. Доберши [24], вейвлет-преобразование является инструментом, разделяющим сигнал на составляющие с разными частотами, каждая из которых затем изучается с разрешением, подходящим масштабу.

Термин «вейвлет» (от французского «ondellette») дословно переводится как «короткая волна». В отечественной литературе встречаются также термины «всплеск», «волночка» и др. Вейвлеты представляют собой короткие волны с нулевым интегральным значением и локализацией по оси независимой переменной (времени), способные к сдвигу по этой оси и масштабированию. Любой вейвлет, используемый в вейвлет-преобразовании, порождает полную ортогональную систему функций. Требования нулевого значения интеграла и ортонормированности являются обязательными условиями применимости вейвлета для целей вейвлет-преобразования. Благодаря малой временной длительности и разным масштабам вейвлета декомпозиция позволяет изучить локальные временные особенности нестационарных процессов, протекающих во времени, что является весомым преимуществом перед преобразованием Фурье, даже в его оконной модификации.

Вейвлет-преобразование одномерного сигнала заключается в его представлении в виде обобщенного ряда или интеграла Фурье по системе базисных функций: $\Psi_{ab} = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ (2.6), сконструированных из исходного (материнского) вейвлета $\psi(t)$, обладающего определенными свойствами за счет операций изменения временного масштаба (a) и сдвига во времени (b). Множитель $\frac{1}{\sqrt{a}}$ обеспечивает независимость нормы этих функций от масштабирующего множителя [15, 22].

Свойство масштабируемости позволяет изменять доминантную частоту, т.е. спектральный состав, вейвлета. Малые значения масштабирующего множителя ($a < 1$) сжимают сигнал и позволяют получить высокочастотные вейвлеты, большие значения масштабирующего множителя ($a > 1$) приводят к растяжению сигнала – т.е. к низкочастотным вейвлетам. Применение масштабирующего коэффициента приводит к сжатию или растяжению сигнала и в частотной области, поэтому

вейвлеты также можно рассматривать как фильтры с ограниченной полосой частот. Таким образом, наличие набора разномасштабных вейвлетов позволяет изучать сейсмический сигнал на разных спектральных уровнях.

Наличие временного сдвига позволяет сканировать изучаемый сигнал, т.е. изучать его на разных временных уровнях. Это свойство и делает вейвлет-преобразование инструментом для изучения динамических процессов.

Описанные выше свойства позволяют говорить о локализации вейвлетов как во временной, так и в частотной области [7].

2.2.2 Требования к вейвлетам

Для применения вейвлет-преобразования возможно использование большого количества вейвлетов, однако все они должны характеризоваться следующими признаками [15]:

1) Частотно-временная локализация – вейвлеты и их спектры отличаются от нуля лишь на коротких временных интервалах;

2) Нулевое среднее – вейвлет должен обладать нулевым моментом для применимости обратного преобразования, т.е. полный интеграл по времени должен равняться нулю. Равенство нулю интеграла вейвлета приводит к тому, что его преобразование Фурье имеет вид полосового фильтра, т.е. при разных масштабах мы получаем набор полосовых фильтров.

3) Автоподобность – самоподобие вейвлета вне зависимости от масштаба и сдвига.

Наиболее применяемые вейвлеты конструируются на производных функции Гаусса:

$$g_0(t) = e^{-\frac{t^2}{2}} \quad (2.7).$$

Это обусловлено тем, что функция Гаусса имеет хорошие показатели локализации как во временной, так и в частотной областях, что позволяет детально анализировать временные функции. В сейсморазведке для изучения волнового поля наиболее распространены два типа вейвлетов: Риккера, также известный как «Мексиканская шляпа», и Морле.

Вейвлет Риккера получается путем двойного дифференцирования функции Гаусса:

$$\Psi(t) = \frac{t^2}{dt^2} e^{-\frac{t^2}{2}} \quad (2.8).$$

$$\Psi(\omega) = \sqrt{2\pi}\omega^2 e^{-\frac{\omega^2}{2}} \quad (2.9).$$

Вейвлет Риккера имеет хорошую локализацию как по времени, так и по частоте. Главным его положительным моментом является факт схожести с реальным сейсмическим сигналом, что положительно сказывается на результатах спектральной декомпозиции данных сейсморазведки.

Аналитическое представление вейвлета Морле имеет следующий вид во временной и частотной областях:

$$\Psi(t) = e^{-\frac{t^2}{a^2}} [e^{ik_0 t} - e^{-\frac{k_0^2 a^2}{4}}] \quad (2.10),$$

$$\Psi(\omega) = a\sqrt{\pi} [e^{-\frac{a^2(k_0-\omega)^2}{4}} - e^{-\frac{a^2(k_0+\omega)^2}{4}}] \quad (2.11)$$

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:

$$\Psi(t) = e^{-\frac{t^2}{a^2}} e^{i2\pi t} \quad (2.12),$$

$$\Psi(\omega) = a\sqrt{\pi} e^{-\frac{a^2(2\pi-\omega)^2}{4}} \quad (2.13)$$

Следует отметить, что применение в качестве базиса вейвлетов реальных, т.е. извлеченных из волнового поля, сигналов невозможно, так как они не удовлетворяют указанным выше требованиям.

2.2.3 Непрерывное вейвлет-преобразование

Сконструируем базис $\Psi(a,b,t)$ с помощью непрерывных масштабных преобразований (a) и сдвигов (b) материнского вейвлета $\Psi(t)$. Тогда прямое (2.14) и обратное (2.15) непрерывное вейвлет-преобразование примут следующий вид:

$$W_s(a, b) = (S(t), \Psi_{ab}(t)) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} S(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2.14),$$

$$S(t) = \frac{1}{C_\Psi} \iint_{-\infty}^{+\infty} W_s(a, b) \Psi_{ab}(t) \frac{da db}{a^2} \quad (2.15), \quad \text{где } C_\Psi - \text{нормирующий}$$

коэффициент, который выражается как: $C_\Psi = \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(\omega)^2 |\omega|^{-1} d\omega < \infty$ (2.16) .

Процесс непрерывного вейвлет-преобразования сейсмических данных может быть описан достаточно простым алгоритмом:

- Выбор материнского вейвлета, при помощи которого будет производиться спектральный анализ.
- Сопоставление вейвлета с масштабом a и локального участка трассы. Сопоставление можно описать вычислением коэффициента корреляции между вейвлетом и участком трассы.
- Сдвиг вейвлета на шаг дискретизации и вычисление нового коэффициента корреляции.
- Перемасштабирование после сканирования вейвлетом всей длины трассы (фактически – изменение анализируемой частоты).

Далее весь алгоритм повторяется для заданного количества частот [15].

2.2.4 Визуализация результатов спектральной декомпозиции.

В результате применения спектральной декомпозиции по алгоритму непрерывного вейвлет-преобразования волновое поле может быть разложено на серию массивов, описывающих амплитудную характеристику заданных гармоник. Дальнейший анализ результатов спектральной декомпозиции заключается в изучении распределения амплитуд различных гармоник по сейсмическому разрезу или вдоль определенного отражающего горизонта.

В общем смысле, получаемые кубы амплитудно-частотных характеристик, являются атрибутами волнового поля. Исходя из этого факта, к ним применимы стандартные подходы визуализации – получение амплитудных срезов по различным направлениям. В случае расчета амплитудных срезов производится визуализация амплитуд по отдельным гармоникам.

Однако наравне со стандартными подходами к визуализации существуют специальные методики, которые нашли широкое применение именно к результатам спектральной декомпозиции. Одной из таких методик является алгоритм цветового комбинирования RGB. На вход алгоритма подается три различные амплитудно-частотных характеристики, которые могут быть представлены вертикальными, горизонтальными или структурными срезами амплитудных кубов частотных гармоник. В рамках алгоритма каждому срезу присваивается свой цвето-код красного (R), зеленого (G) или синего (B) цвета. При этом интенсивность цвета зависит от значения амплитуды. Отсутствие амплитуды гармоники характеризуется черным цветом, а ее максимальное значение – наибольшей насыщенностью. В результате образуются три цветовых канала, описывающих поведение амплитуд трех заданных гармоник. Далее в рамках алгоритма производится объединение цветовых каналов, таким образом, что выходной срез в каждой точке характеризуется тремя значениями амплитуды, каждому из которых соответствует свой цветовой канал. Цвет полученного на выходе дискрета массива определяется в рамках трехмерного цветового куба, который описывает все цвета

путем комбинации красного, зеленого и синего цветового канала. Цветовое разрешение такой палитры примерно составляет 16 млн. цветов, исходя из максимального значения насыщенности цвета 256 единиц. Необходимо отметить, что передача цвета в данном случае определяется типом программного обеспечения и приведенная характеристика цветности является теоретически максимально возможной, однако на практике не все геофизические пакеты способны ее отобразить в полной мере.

Подобный метод визуализации характеризуется рядом преимуществ:

- Лучшая цветовая дифференциация, по сравнению со стандартными атрибутами волнового поля. При этом смена цвета отражает изменение спектральных характеристик поля.
- Одновременное использование трех гармоник позволяет изучить волновое поле сразу на нескольких масштабах, что позволяет более детально проанализировать сейсмические данные, а также найти возможные закономерности во взаимном изменении спектральных характеристик.
- Использование гармоник в области доминантного значения частоты волнового поля позволяет получить срезы с меньшим вкладом шумовой компоненты. Данный вывод основан на неравномерном распределении энергий полезной и шумовой компоненты по спектру. Наибольшее соотношение сигнал-шум будет наблюдаться именно в области доминантного значения. Низкочастотная область чаще всего подвержена искажению в процессе обработки, в то время как в высокочастотной области наблюдается естественное затухание сигнала, что ведет к преобладанию случайного шума.

Недостатком метода цветового комбинирования является его «уникальность», которая выражается в необходимости применения специализированных программных пакетов для реализации алгоритма.

Глава 3 Исследование особенностей непрерывного вейвлет-преобразования на модельных данных.

Как было показано в предыдущей главе, спектральная декомпозиция является достаточно информативным инструментом анализа волнового поля. Однако применение данной методики невозможно без понимания причин, вызывающих аномалии в амплитудно-частотных характеристиках.

Рассмотрение этого вопроса необходимо начать с исследования [42]. В рамках своей работы он производит оконное преобразование Фурье для синтетического сейсмического разреза среды при наличии выклинивающегося пласта.

Применение преобразования Фурье в узком окне позволило получить спектральное представление модельного сейсмического разреза. При этом отмечаются закономерные области локального затухания гармоник в зависимости от мощности клина. Анализ амплитудно-частотных срезов позволяет установить обратную зависимость периода затухания гармоник от мощности пласта.

Характер поведения спектральных характеристик волнового поля зависит от процессов интерференции. В зависимости от частоты гармоники, то есть от длины ее волны, это затухание проявляется на разных уровнях и имеет разный период.

Однако данное исследование основано на использовании только преобразования Гэбора, поэтому выполнение подобного исследования для метода НПВ является актуальной задачей.

3.1 Моделирование волнового поля

Для изучения возможностей интерпретации результатов НВП и последующего цветового комбинирования выполнено построение трехмерной модели выклинивающего пласта с переменной акустической жесткостью. Модель построена таким образом, что в одном направлении происходит изменение мощности клина, а в перпендикулярном ему направлении изменяется его акустическая жесткость, при этом импеданс вмещающей среды выше и ниже клина остается постоянным.

Подобная синтетическая модель хорошо описывает теоретическое строение ачимовского коллектора - наличие песчаного тела в глинистых вмещающих породах, что наблюдается по графикам спонтанной поляризации в скважинах (рис. 18). Ввиду того, что гистограммы распределения значений акустической жесткости для терригенных обломочных пород имеют достаточно обширный интервал перекрытия, акустическая жесткость клина в модели задается переменной.

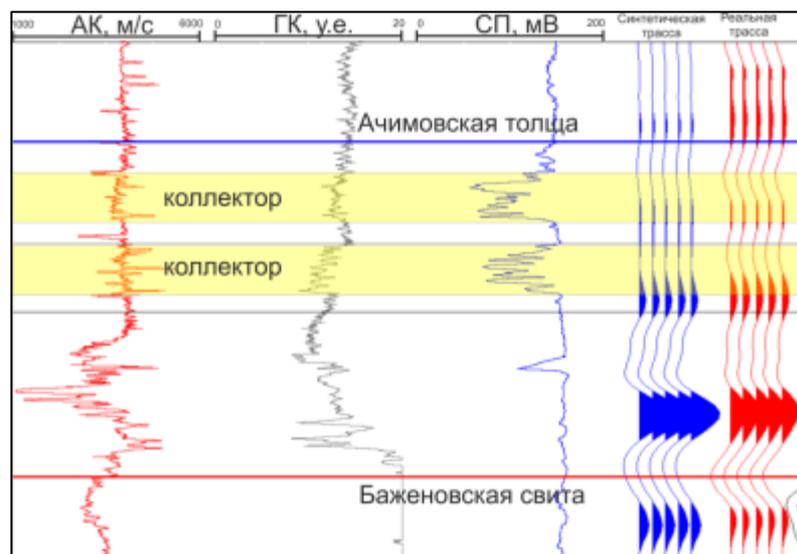


Рис. 18 Результат акустического моделирования по скважине

Для получения трехмерного синтетического волнового поля использован импульс Риккера с доминантной частотой 30 Гц. Моделирование волнового поля

производилось в рамках вертикального распространения волны с пренебрежением процессами образования на границах обменных и кратных волн. Такие допущения позволяют провести чистый эксперимент в условиях «идеального» поля, то есть в предположении, что волновое поле состоит только из полезных однократно отражённых волн (рис. 19).

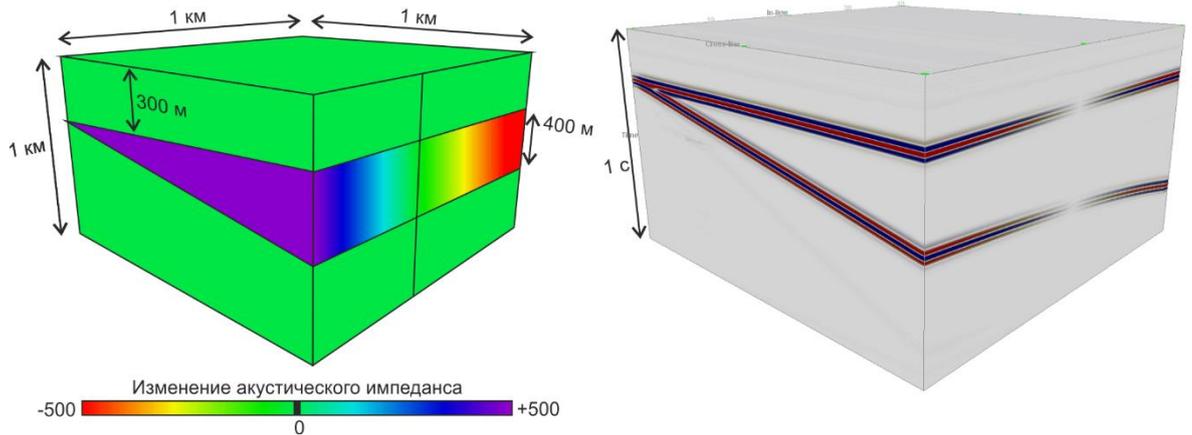


Рис. 19 Модель клина с переменной акустической жесткостью (слева) и соответствующее синтетическое волновое поле (справа).

Полученное синтетическое волновое поле использовалось для НВП с сигналом Риккера. На выходе были получены кубы, описывающие амплитуды гармоник в пределах информативной части спектра. Дальнейший анализ результатов НВП заключался в изучении разрезов и карт цветового комбинирования по различным сечениям модельного куба. С целью оценки влияния разных параметров модели на изображения RGB был произведен анализ на качественном и количественном уровне [6, 16].

Рассмотрены срезы в разных плоскостях, имитирующих следующие двумерные модели:

- 1) Модель выклинивающегося пласта с акустической жесткостью более высокой, чем во вмещающей среде (модель жесткого клина).
- 2) Модель выклинивающегося пласта с меньшей акустической жесткостью, чем во вмещающей среде (модель клина с меньшей жесткостью).

- 3) Модель тонкого слоя с переменной акустической жесткостью в однородной среде (модель пласта постоянной мощности).
- 4) Модель тонкого слоя с переменной мощностью и акустической жесткостью в однородной среде (модель пласта постоянной временной мощности).
- 5) Модель горизонтального сечения выклинивающегося пласта (модель горизонтального среза)

3.2 Качественный анализ результатов моделирования

В рамках качественного анализа результатов НВП по модельным данным были рассмотрены характерные сечения RGB-куба.

1. Модель жесткого клина

Модель выклинивающегося пласта с акустической жесткостью более высокой чем во вмещающей среде.

В волновом поле такая модель отображается в виде двух выклинивающихся отражающих границ с положительным коэффициентом отражения на кровле и отрицательным коэффициентом отражения на подошве. На рис. 20 показан разрез цветового комбинирования для описанной модели.

На разрезе цветового комбинирования в области толщин пласта, где отсутствует интерференция волн от кровли и подошвы, наблюдается серая окраска рефлектора, отражающая одинаковое распределение амплитуд по гармоникам. Изменение характера цветового смешивания наблюдается при уменьшении толщины клина и наступает до проявления видимой интерференции отражений от кровли и подошвы в волновом поле.

Характер смены цветовых аномалий соответствует постепенному затуханию гармоник в зависимости от их частоты. За счет большей длины волны, низкочастотные гармоники раньше подвергаются воздействию эффекта

интерференции, что приводит к формированию аномалии красного цвета в мощной части клина. С уменьшением мощности цвет аномалии меняется к синему и фиолетовому оттенку, отражая преобладание высоких частот. В области точки выклинивания образуется яркая аномалия, отвечающая экстремальным значениям по всем спектральным каналам.

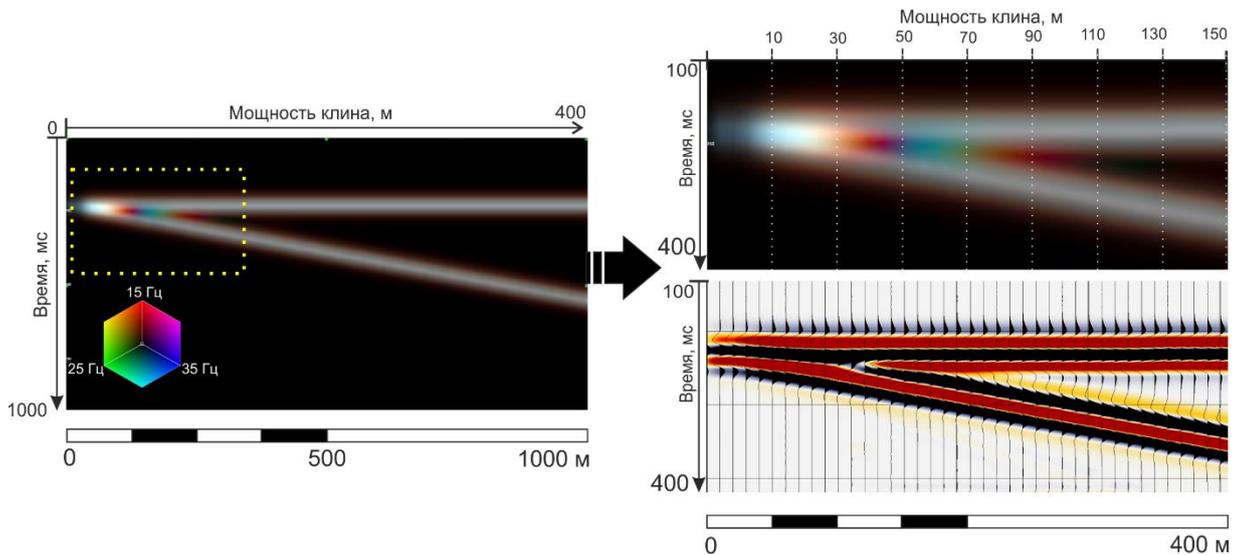


Рис. 20 Разрез цветового комбинирования (слева) для клина с большей акустической жесткостью, чем во вмещающей среде. Справа показаны: увеличенная часть RGB-разреза (сверху) и волновое поле (снизу).

2. Модель клина с меньшей жесткостью

Модель выклинивающегося пласта с акустической жесткостью меньшей, чем во вмещающей среде.

В волновом поле такая модель отображается в виде двух выклинивающихся отражающих границ с отрицательным коэффициентом отражения на кровле и положительным коэффициентом отражения на подошве. На рис. 21 показан разрез цветового комбинирования для описанной модели.

Характер цветовой аномалии в случае пласта с меньшим импедансом остается аналогичны тому, который наблюдается для модели жесткого клина (рис. 20). Однако проявление цветowych аномалий на RGB-разрезе наступает при меньшей мощности пласта. Такой эффект связан с малой скоростью

распространения упругих волн внутри тонкого пласта, что приводит к меньшей длине волны, за счёт чего эффект интерференции волн от кровли и подошвы клина наступает при меньшей мощности (рис. 21).

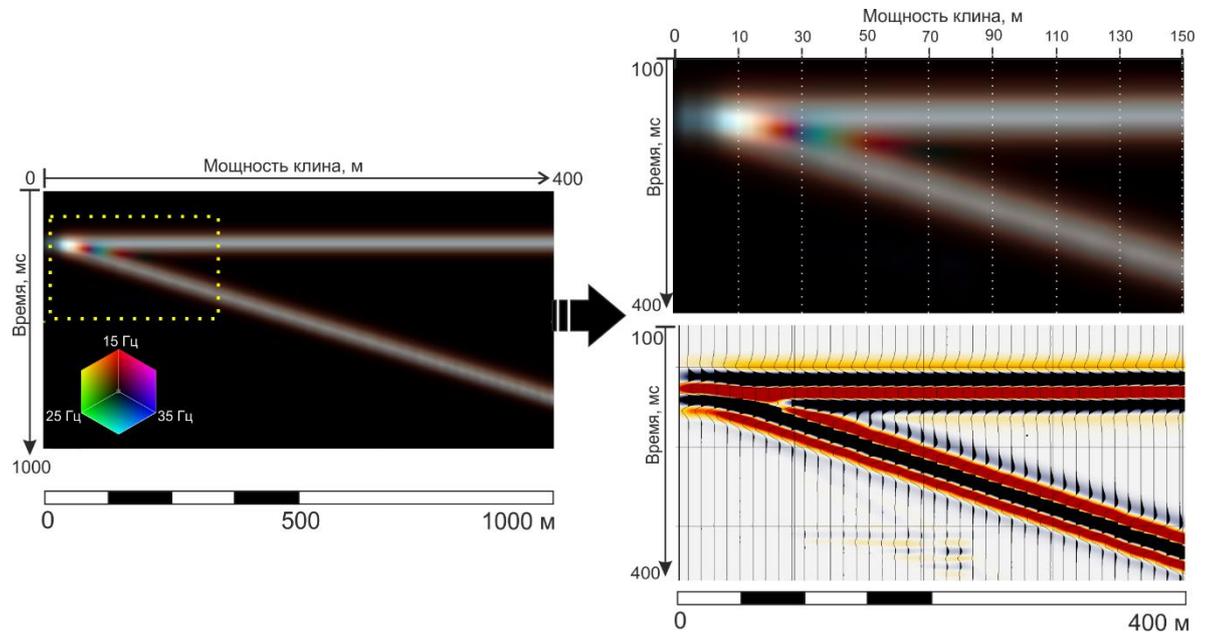


Рис. 21 Разрез цветового комбинирования (слева) для клина с меньшей акустической жесткостью, чем во вмещающей среде. Справа показаны: увеличенная часть RGB-разреза (сверху) и волновое поле (снизу).

3. Модель пласта постоянной мощности

Модель с тонким пластом внутри однородной среды, при этом мощность пласта сохраняется постоянной, а акустический импеданс внутри него меняется по отношению к вмещающей среде.

В волновом поле такая модель выражается в смене полярности рефлектора с отрицательного (в области отрицательного контраста акустического импеданса пласта относительно вмещающей среды) на положительный (в области положительного контраста акустического импеданса пласта относительно вмещающей среды).

В случае присутствия тонкого слоя постоянной мощности на разрезе цветового комбинирования наблюдается изменение цветовой аномалии вдоль разреза (рис. 22). Меньшая скорость продольной волны в левой части разреза

приводит к тому, что отражение от подошвы тонкого пласта запаздывает по сравнению с правой высокоскоростной частью. Это обуславливает различия в схеме интерференции волн и разный цвет RGB-смешивания. Однако данная модель не исключает влияние изменения импеданса на характер цветового смешивания.

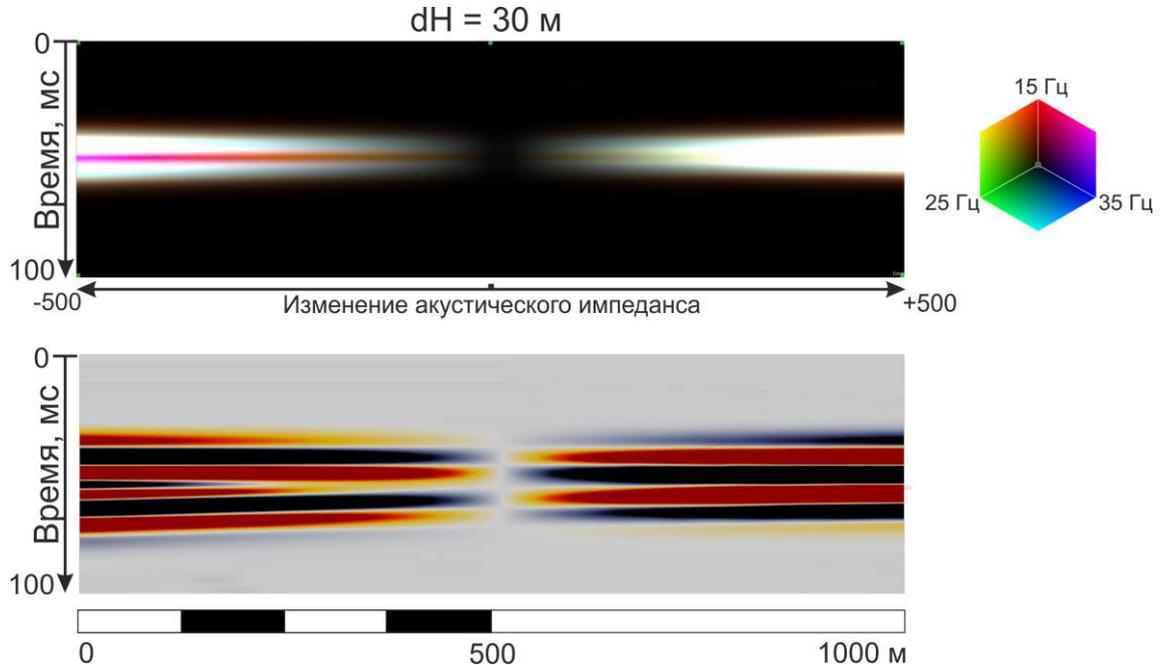


Рис. 22 Разрез цветового комбинирования (сверху) для выдержанного тонкого пласта мощностью 30 м и соответствующее волновое поле (снизу).

4. Модель постоянной временной мощности

Модель с тонким пластом внутри однородной среды, при этом мощность пласта и акустический импеданс внутри него меняются. Изменение мощности пласта смоделировано таким образом, чтобы его временная мощность на сейсмическом разрезе оставалась постоянной.

В волновом поле такая модель выражается в смене полярности рефлектора с отрицательного на положительный, по аналогии с рассмотренной ранее моделью (3).

В рамках модели равной временной мощности описывается аналогичная ситуация присутствия тонкого пласта, однако его мощность изменяется таким образом, чтобы обеспечить одинаковую разность прихода отражённых волн от кровли и подошвы. Акустическая жесткость тонкого пласта изменялась аналогично

предыдущей модели: в левой части импеданс слоя меньше, чем у вмещающей среды, в правой части импеданс слоя больше, чем у вмещающей среды.

На разрезе цветового смешивания (рис. 23) обе части пласта с низким и высоким импедансом характеризуются одинаковыми цветовыми аномалиями. Данный факт позволяет установить отсутствие прямого влияния акустической жесткости на результат цветового комбинирования. Главный влияющий фактор – временная мощность пласта, определяющая интерференцию сигналов от его кровли и подошвы.

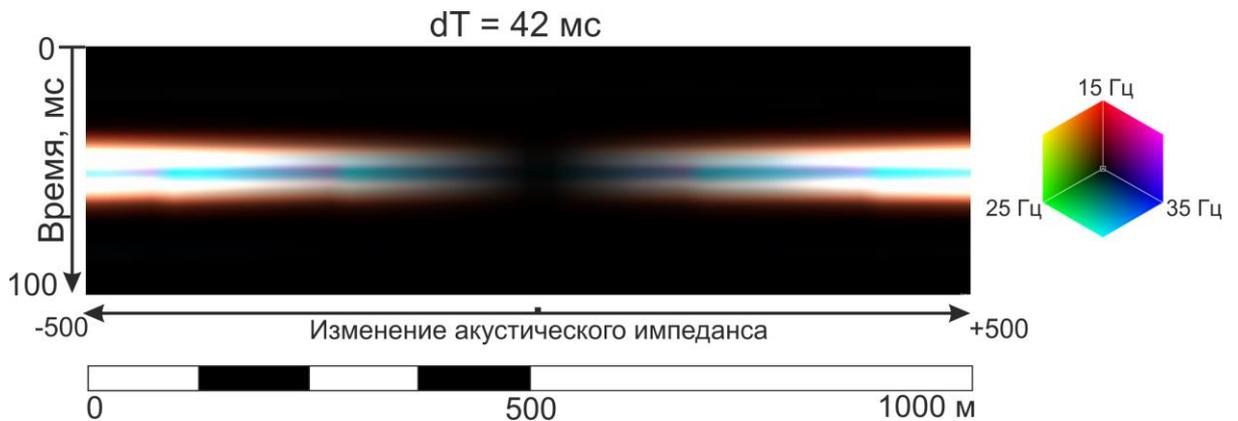


Рис. 23 RGB-разрез для тонкого пласта равной временной мощности.

5. Горизонтальный срез

Горизонтальный срез куба цветового комбинирования представляет собой RGB-карту вдоль поверхности рефлектора (рис. 24). На полученной карте цветового смешивания видно постепенное смещение RGB-аномалий, что отражает запаздывание наступления интерференции в низкоскоростной части клина (верхняя часть карты). Необходимо заметить, что характер поведения аномалий при этом остается постоянным, что отражает независимость результатов от характера перепада акустических свойств на границе тонкого слоя.

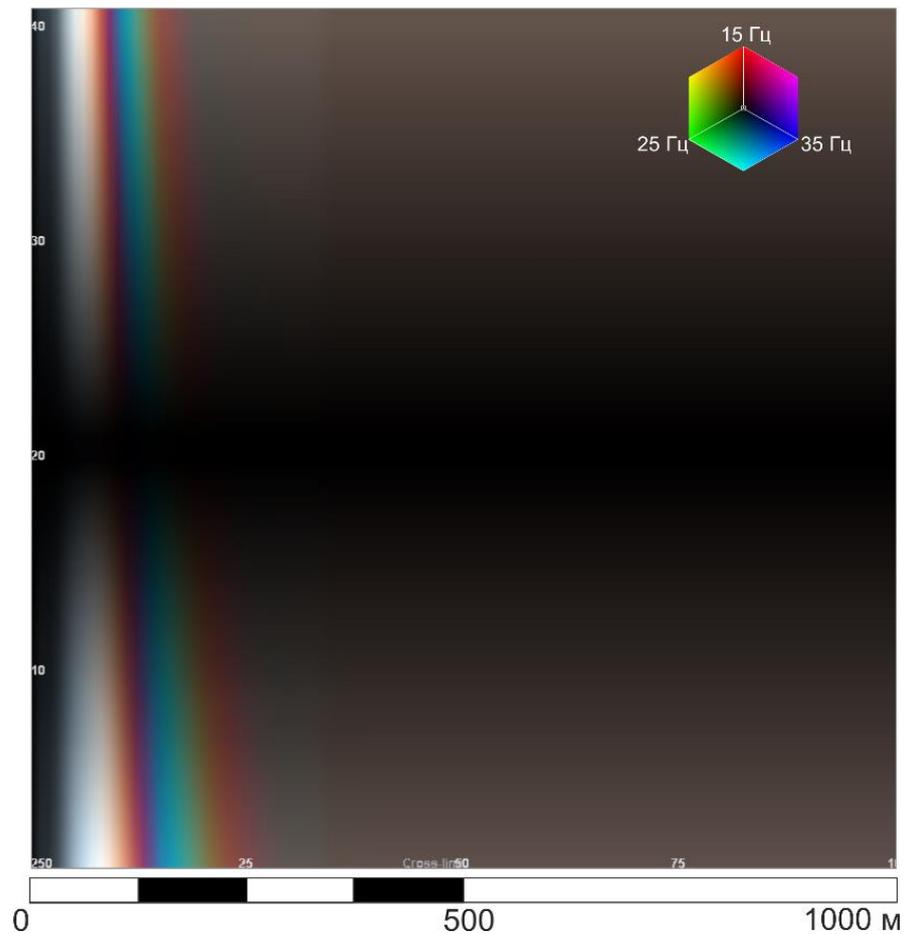


Рис. 24 RGB-карта вдоль кровли клина.

Выполненное исследование, основанное на модельном волновом поле, позволяет сделать следующие выводы [6]:

- 1) Главная роль в появлении спектральных аномалий в результатах вейвлет-преобразования принадлежит явлению интерференции волн.
- 2) Характер цветовой RGB-аномалии позволяет предполагать лишь наличие интерферирующего объекта, однако не дает возможности установить относительные изменения акустической жесткости. Таким образом, линзы, выполненные глинистым или песчаным материалом, будут характеризоваться одинаковыми аномалиями при равной временной мощности на сейсмическом разрезе.
- 3) Относительные изменения акустических свойств влияют только на интенсивность возникающих цветовых аномалий за счет больших амплитудных характеристик.

4) Результаты спектральной декомпозиции на RGB-разрезах характеризуются хорошей разрешающей способностью по вертикали, которая зависит от длины волны сканирующего вейвлета. При этом аномалии цветового комбинирования локализованы по времени и соответствуют положению интерферирующего объекта.

3.3 Количественный анализ результатов непрерывного-вейвлет-преобразования

Для определения количественных характеристик возникающих спектральных аномалий выполнен детальный анализ распределения амплитуд по частотным кубам.

Как видно из разрезов в направлении выклинивания, максимально проявленные аномалии наступают с некоторого момента до интерференции отражений от кровли и подошвы. Максимальные вариации спектральных аномалий наблюдаются в срединной области клина, уменьшаясь к кровельной и подошвенной части (рис. 25).

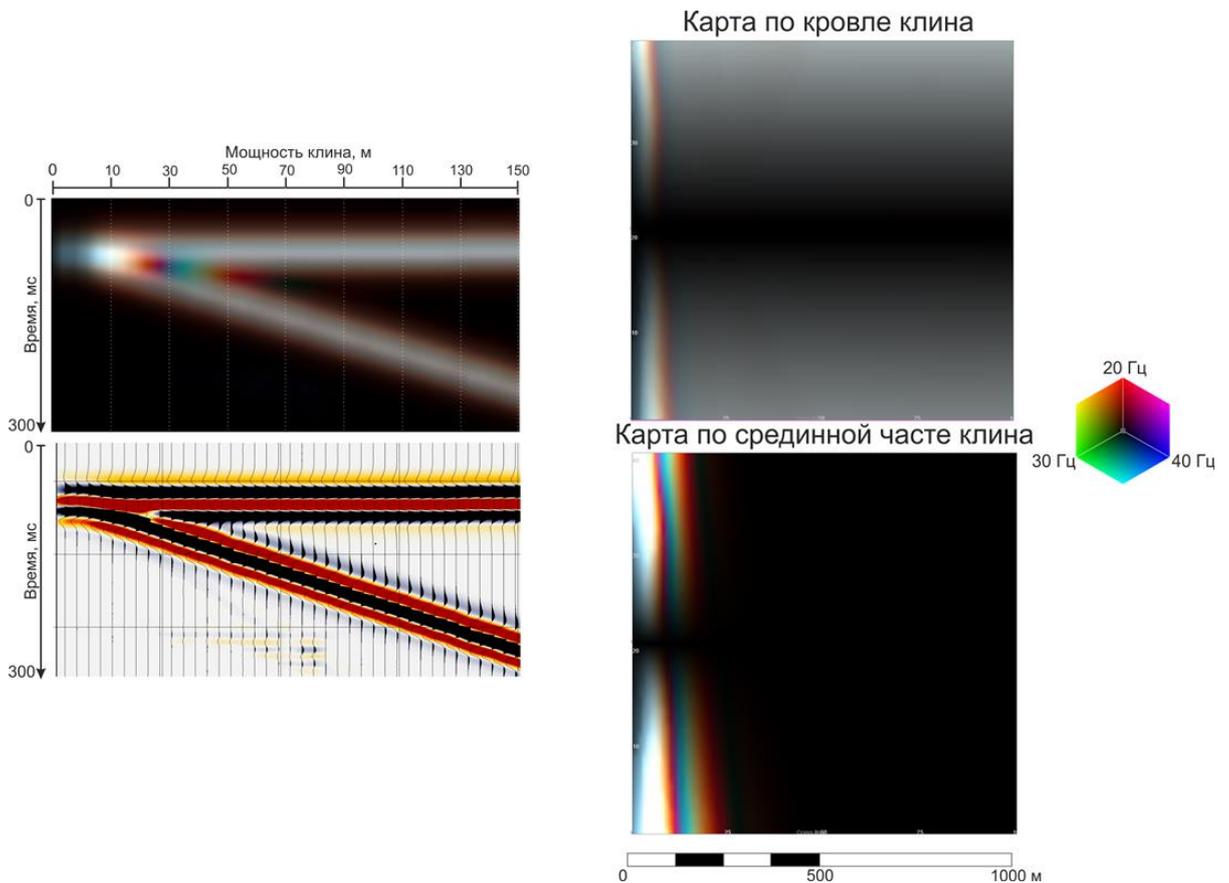


Рис. 25 RGB-разрез клина, и соответствующее ему волновое поле (слева), карты спектрального смешивания по кровле и срединной части клина (справа).

С целью определения закономерностей возникновения спектральных аномалий выполнено изучение вариаций амплитуд гармоник по срезам вдоль кровли и в центральной части клина.

На первом этапе было выполнено изучение вариации амплитуд отдельных гармоник в центральной части клина. Для этого амплитуды гармоник, рассчитанных для разных соотношений акустической жесткости, были вынесены на общий график, отражающий вариацию амплитуды в зависимости от временной мощности клина (рис. 26).

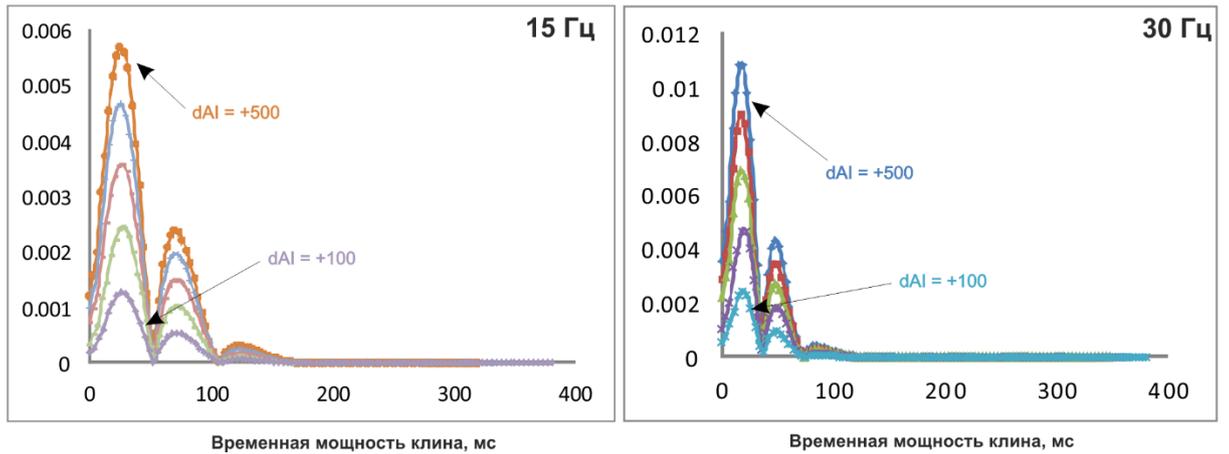


Рис. 26 Графики изменения амплитуды гармоники 15 Гц (слева) и 30 Гц (справа). Цветом показаны кривые для разных значений скорости продольной волны внутри клина (скорость вне клина во всех случаях является постоянной).

Наличие интерферирующего слоя в разрезе приводит к появлению закономерных затуханий и усилений амплитуды гармоник. Анализ графиков амплитудных характеристик по отдельным частотам позволяет сделать вывод об отсутствии влияния акустической жесткости интерферирующего пласта на характер изменений графика амплитуд. Величина скачка акустических свойств на границе сред влияет только на относительную амплитуду спектра.

Характер распределения аномалий указывает на их зависимость от частоты гармоники, поэтому для изучения этого эффекта был построен двумерный спектр, отражающий влияние временной мощности пласта на амплитуды гармоник (рис. 27).

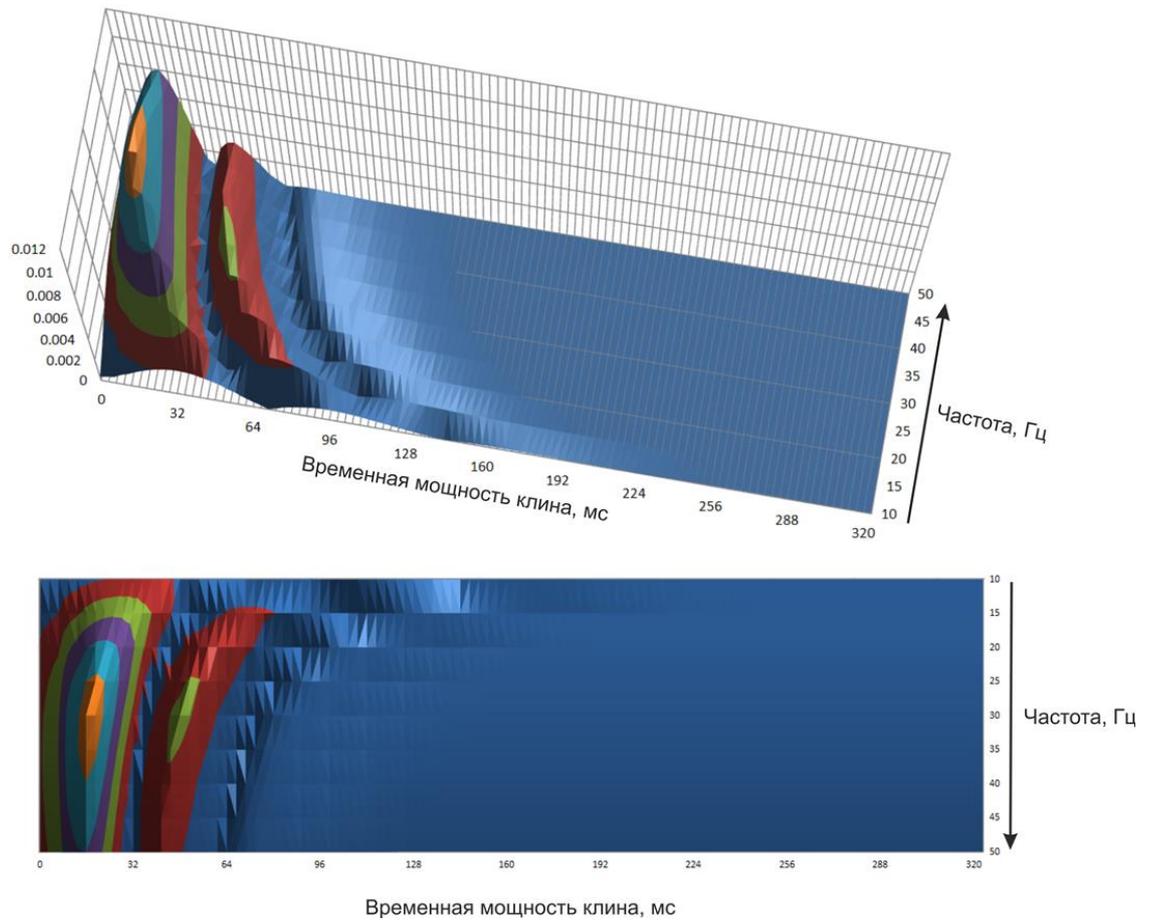


Рис. 27 Двумерные спектры, отражающие изменение амплитуды гармоник в зависимости от мощности клина в срединной части клина.

На двумерном спектре выклинивающегося пласта по всем гармоникам наблюдаются характерные области затухания, зависящие от частоты гармоники.

При этом необходимо учитывать, что результат НВП, в отличие от преобразования Фурье, привязан к временным отсчетам, поэтому двумерный спектр будет отличаться при рассмотрении амплитуд гармоник вдоль различных сечений. Исходя из этого, был рассмотрен двумерный спектр амплитуд вдоль кровли рефлектора (рис. 28)

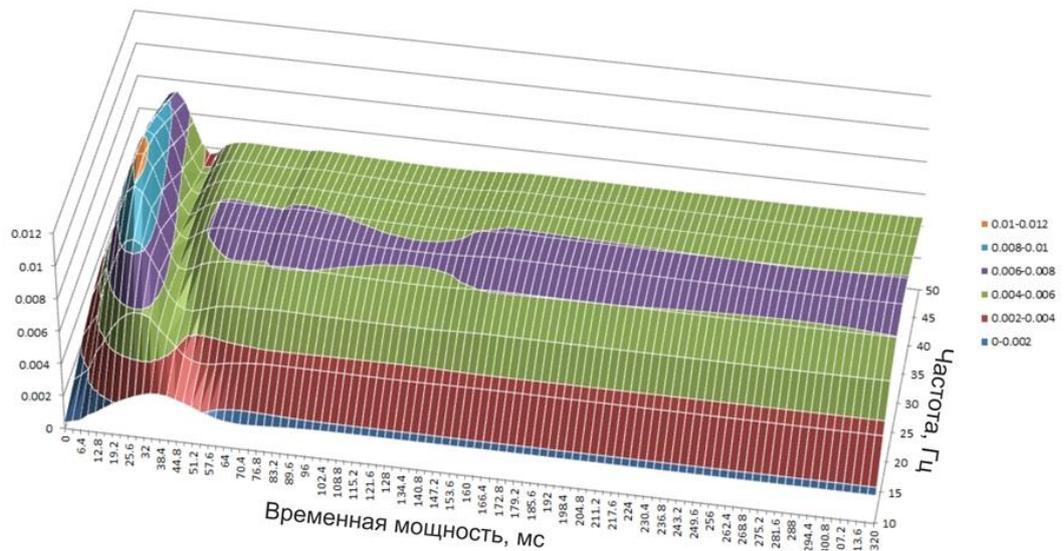


Рис. 28 Двумерные спектры, отражающие изменение амплитуды гармоник в зависимости от временной мощности в кровельной части клина.

Анализ полученных двумерных графиков распределения амплитуд гармоник позволяет сделать следующие выводы:

1. Характер двумерного спектра НВП зависит от времени, что отражает временную локализацию преобразования.
2. При использовании НВП на спектральном разрезе однозначно фиксируется область начала флуктуаций амплитуд. Начальная точка спектральных аномалий зависит от анализируемой частоты, и как следствие – сканирующего вэйвлета, а также от пространственного положения анализируемого среза. Следовательно, возникновение аномалий на разных сечениях куба происходит асинхронно по временной мощности. В центральной части клина аномалии спектра возникают при больших значениях временной мощности, по сравнению с кровельной частью.
3. В случае применения преобразования Фурье затухание гармоник носит строго периодический характер. Спектральные характеристики, рассчитанные по алгоритму НВП, характеризуются затуханием.
4. Аномалии спектра НВП характеризуются ассиметричным распределением амплитуд, в отличие от метода Фурье, где анализируемые функции

представлены гармоническими колебаниями. Максимальные амплитуды наблюдаются для гармоник в районе доминантного значения частоты волнового поля, затухая в область низких и высоких частот. Затухание амплитуд в рамках одной гармоники также происходит неравномерно – наблюдается смещение экстремума в область меньших временных толщин.

Для определения закономерностей изменения амплитудных характеристик был выполнен анализ графиков амплитуд по разным гармоникам в рамках одного разреза по направлению выклинивания пласта по кровле и в срединной части клина (рис. 29).

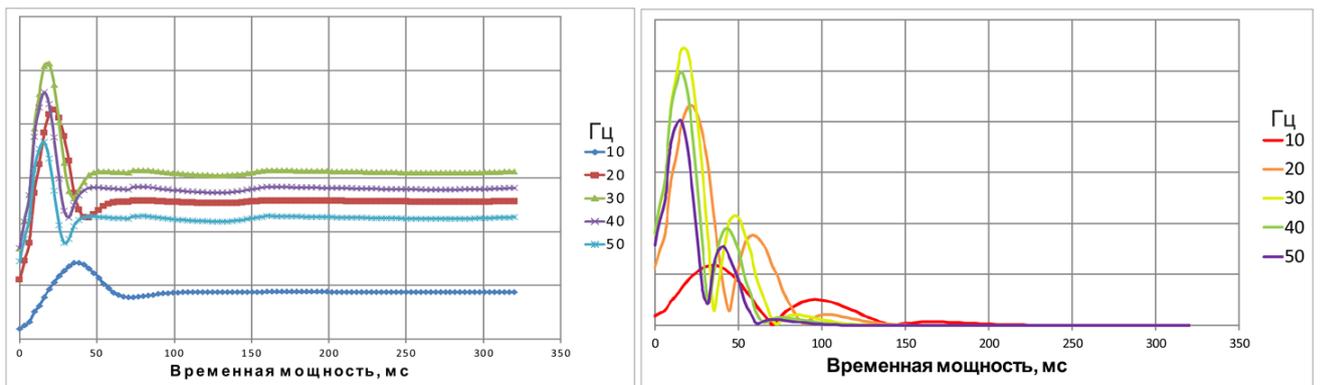


Рис. 29 Графики распределения амплитуд гармоник в кровельной (слева) и срединной (справа) части клина. Цветом показаны гармоники разных частот.

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. Графики амплитуд вдоль среднего сечения клина, в свою очередь, сходятся к нулевому значению, что отражает отсутствие амплитуд волнового поля вне интерференционной части. Данный факт позволяет установить значительную зависимость амплитуды гармоники от сигнала источника.

Анализ графиков подтверждает более сильное возмущение гармоник в средней части клина, по сравнению с его кровельной областью, что объясняется большим влиянием интерференции на амплитуды волнового поля именно внутри тонкого слоя.

Для анализа закономерностей изменения амплитудных характеристик были построены графики зависимости амплитуды от временной мощности для гармоники 10 Гц в кровельной и срединной части клина (рис. 30). Анализ графиков позволяет установить синхронность главных экстремумов функций амплитуды от временной мощности. Амплитудная аномалия в кровельной части характеризуется большим значением, однако меньшее количество флуктуаций делает ее менее информативной при анализе спектральных карт. Исходя из этого, можно предположить целесообразность оценки спектральных характеристик не в кровле пласта, т.е. вдоль оси синфазности отражающего горизонта на сейсмическом разрезе, а на некотором смещении ниже прослеживающийся границы, таким образом, чтобы пересечь интерферирующий объект.

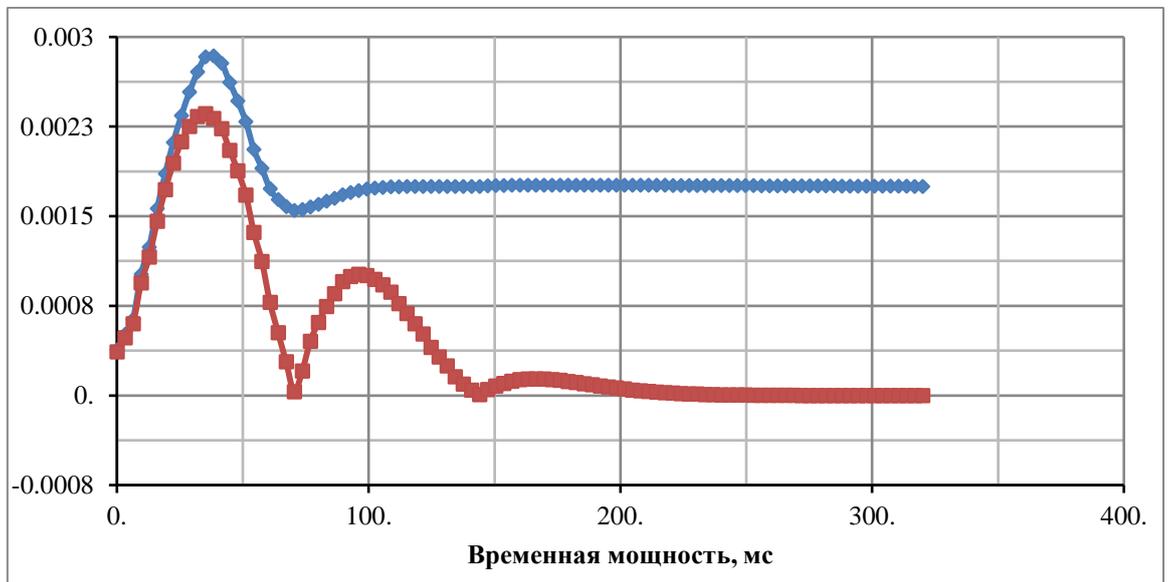


Рис. 30 Сравнение графиков изменения амплитуды гармоник 10 Гц для кровельной (синяя) и срединной (красная) части пласта.

Исходя из подобия изменения графиков амплитуд для кровельной и срединной части клина, для дальнейшего анализа были выбраны графики, описывающие изменения амплитуд внутри клина, ввиду их более сложной структуры.

С использованием графиков изменения амплитуд гармоник для срединной части клина, была составлена таблица 3, отражающая зависимость положения основных экстремумов от временной мощности пласта. Используя полученные значения, были построены графики зависимости временной мощности, при которой возникает экстремум, от периода гармоник (рис. 31). Графики отражают линейную зависимость момента наступления флуктуации от периода анализируемой гармоник и временной мощности пласта.

Таблица 3

Временная мощность, при которой наблюдаются экстремумы амплитуд гармоник (модель 30 Гц)

Гц	T, мс	Максимальное значение	Первый минимум	Побочный максимум	Второй минимум	Побочный максимум	Начало флуктуаций
10	0.1	0.035	0.07	0.097	0.14	0.165	0.23
20	0.05	0.022	0.045	0.059	0.09	0.105	0.15
30	0.033	0.018	0.036	0.049	0.072	0.085	0.123
40	0.025	0.016	0.032	0.043	0.064	0.077	0.11
50	0.02	0.014	0.03	0.041	0.06	0.072	0.102

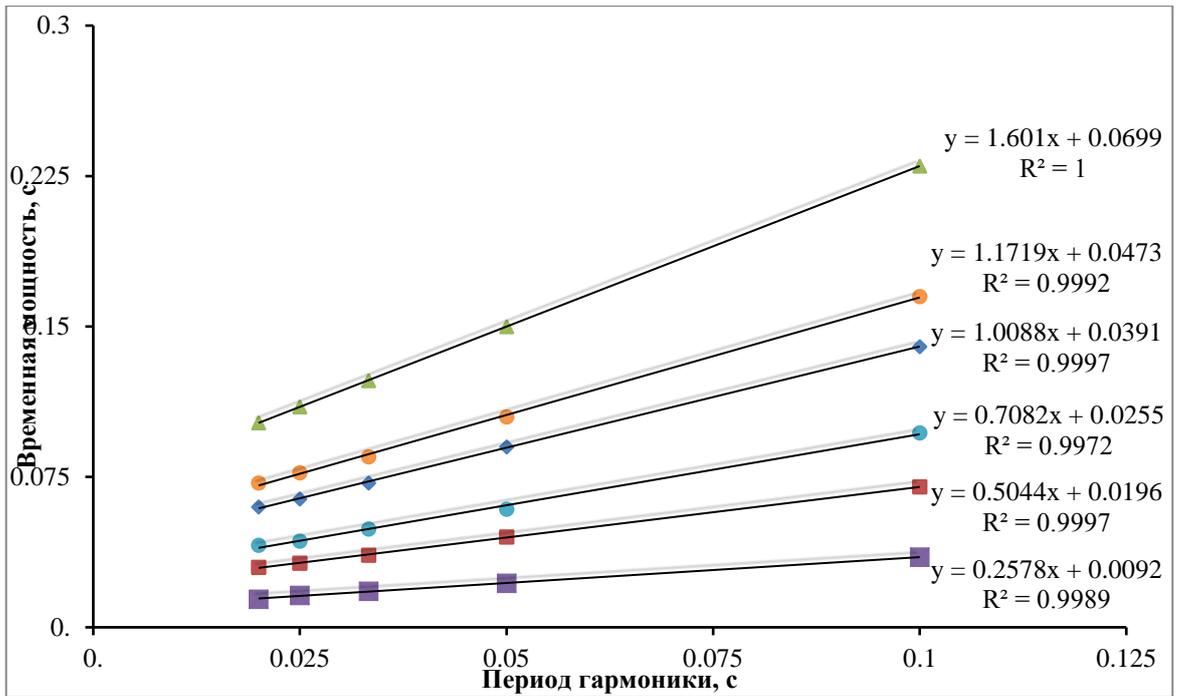


Рис. 31 Зависимость временной мощности пласта, при которой наблюдается экстремум графика амплитуд, от периода анализируемой гармоники (для волнового поля с доминантной частотой 30 Гц).

Аналогичные исследования были выполнены для синтетического волнового поля, полученного с использованием сигнала Риккера с доминантной частотой 20 Гц. Далее все проделанные вычисления были повторно выполнены для нового сейсмического куба. В итоге была составлена таблица 4, отражающая закономерности флуктуаций в зависимости от временной мощности клина при доминантном значении сигнала 20 Гц (рис. 32).

Таблица 4

Временная мощность, при которой наблюдаются экстремумы амплитуд гармоник (модель 20 Гц)

Гц	τ	Максимальное значение	Первый минимум	Начало флуктуаций
10	0.1	0.039	0.072	0.254
20	0.05	0.026	0.051	0.18

30	0.03	0.022	0.045	0.15
40	0.025	0.021	0.041	0.137
50	0.02	0.02	0.04	0.128

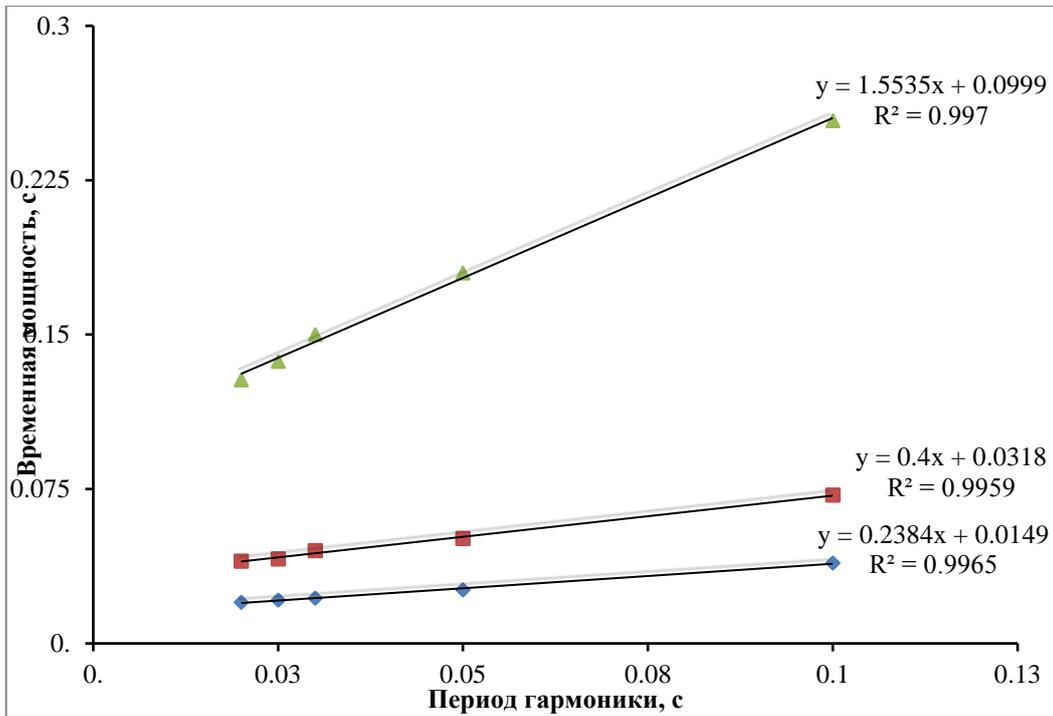


Рис. 32. Зависимость временной мощности, при которой наблюдается экстремум графика амплитуд, от периода анализируемой гармоники (для волнового поля с доминантной частотой 20 Гц).

В случае уменьшения доминантного значения сигнала, использованного при расчете синтетического волнового поля, угол наклона трендов остался неизменным, однако изменяется точка пересечения оси ординат, что отражает более раннее (по временной мощности) начало флуктуаций спектральных кривых, связанное с большей длительностью сигнала по времени.

Таким образом, можно сделать вывод, что зависимость экстремальных значений спектров от временной мощности отражает также и влияние временной протяженности сигнала источника, связанной с его доминантной частотой. Для

высокочастотных полей влияние интерференции будет наблюдаться при меньших значениях временной мощности, по сравнению с низкочастотными данными, что отражает большую разрешающую способность высокочастотного поля.

Резюмируя проведенные исследования, можно отметить основные результаты:

1. Изменение спектральных характеристик зависит от положения среза, вдоль которого производится изучение гармоник (кровельная, подошвенная или срединная часть тонкого пласта).

2. Максимальные флуктуации (следовательно, и цветовые аномалии при RGB-смешивании) наблюдаются в срединной части тела и обусловлены интерференцией.

3. Наличие интерферирующего объекта в разрезе приводит к периодичности спектра.

4. Характер спектральных аномалий зависит от временной мощности пласта и доминантной частоты волнового поля, при этом акустическая жесткость интерферирующего объекта не оказывает влияния на характер флуктуаций амплитуд гармоник.

5. Наиболее информативным для анализа является интервал средних частот 10-40 Гц. Различия между спектральными кривыми для более высоких частот быстро убывают с увеличением значения частоты гармоники. Данный факт легко объяснить при помощи графика зависимости периода гармоники от ее частоты (рис. 33): разница в значении периода соседних гармоник стремительно уменьшается с увеличением частоты.

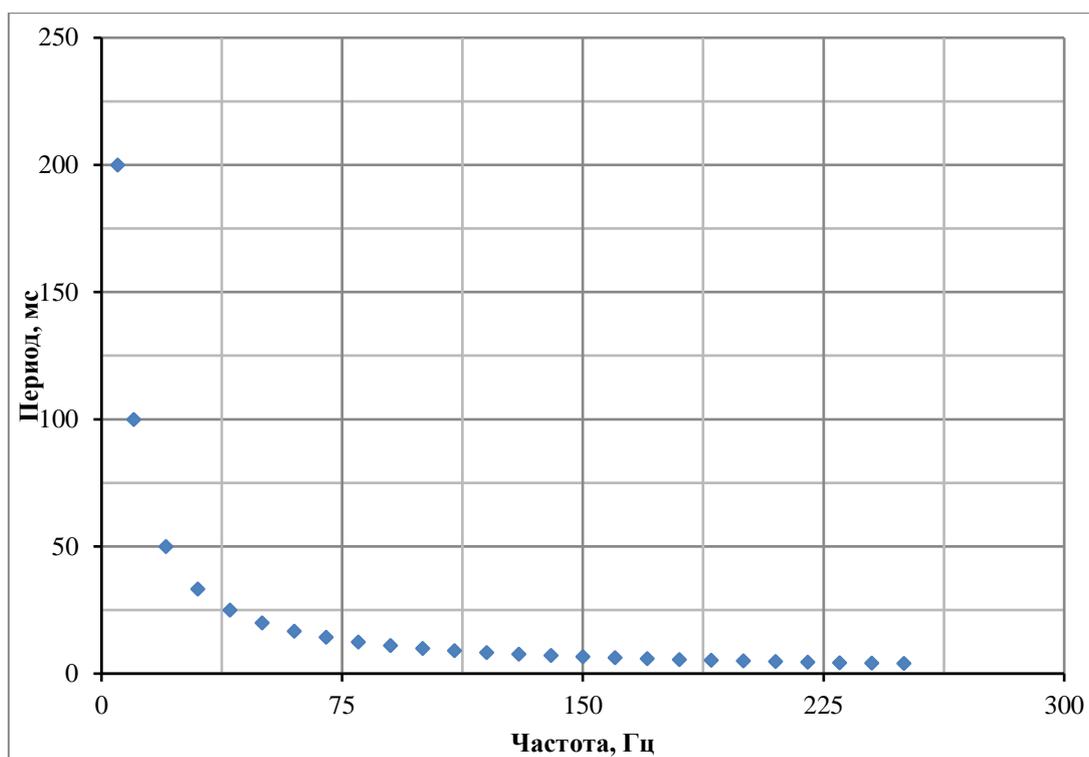


Рис. 33 Зависимость периода гармоник от её частоты

3.4 Возможности применения спектрального анализа

Как было показано в предыдущем разделе, необходимое условие возникновения цветовых аномалий при RGB-смешивании заключается в наличии эффектов интерференции. Данное следствие делает метод спектрального разложения и последующего RGB-анализа волнового поля эффективным именно для изучения ачимовского типа разреза, в котором проявлены локальные относительно тонкие объекты, представленные каналами и конусами выноса турбидитовых и оползневых потоков. Возможность выделить в разрезе продуктивные тела и определить их геометрические параметры является крайне важной задачей.

Модельные данные позволяют установить отсутствие прямого влияния изменения акустической жесткости пласта на характер спектральных аномалий.

Исходя из этого, переход к прогнозу фильтрационно-емкостных свойств по результатам спектральной декомпозиции затруднителен и определяется в первую очередь поведением исходных амплитуд. Амплитуда гармоники связана не только с акустической жесткостью, но и с такими параметрами как мощность пласта и энергия зондирующего сигнала.

Зависимость поведения спектральных характеристик от временной мощности пласта создает предпосылки для использования спектрального анализа с целью прогноза эффективной мощности. Для оценки подобной возможности рассмотрим поведение спектральных амплитудных характеристик на интервале временных толщин меньше, чем $\frac{1}{4}$ длины волны, т.е. на интервале, где теряется возможность прямого прогноза по временной толщине.

Анализ амплитудных характеристик позволяет сделать два вывода о возможности их использования для задач прогноза эффективной толщины пласта:

1) Использование значения амплитуды в качестве прогнозного параметра может привести к некорректной оценке толщины – распределения амплитуд гармоник подчинены исходному распределению энергии в зондирующем сигнале (в данном случае сигнале Риккера с доминантной частотой 30 Гц). Однако необходимо учитывать, что значение амплитуды также будет контролироваться и величиной акустического скачка на границе раздела.

2) Использование доминантного значения гармоники возможно для прогнозирования эффективной мощности. Как видно из графиков (рис. 34) наблюдается обратная связь мощности клина и доминантного значения гармоники – для тонких участков пласта характерны высокочастотная доминанта, тогда как для более толстых участков наблюдается преобладание низкой частоты. Данная закономерность создает предпосылки для использования спектральных характеристик с целью прогноза мощности пласта.

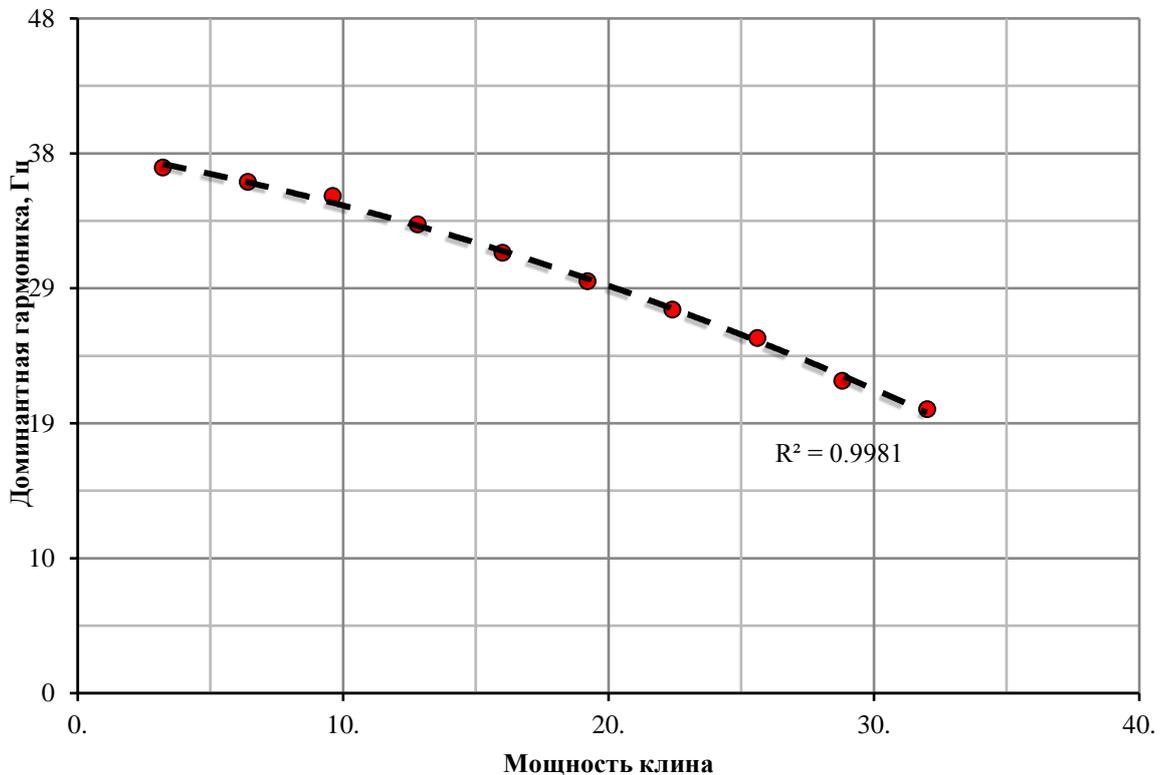
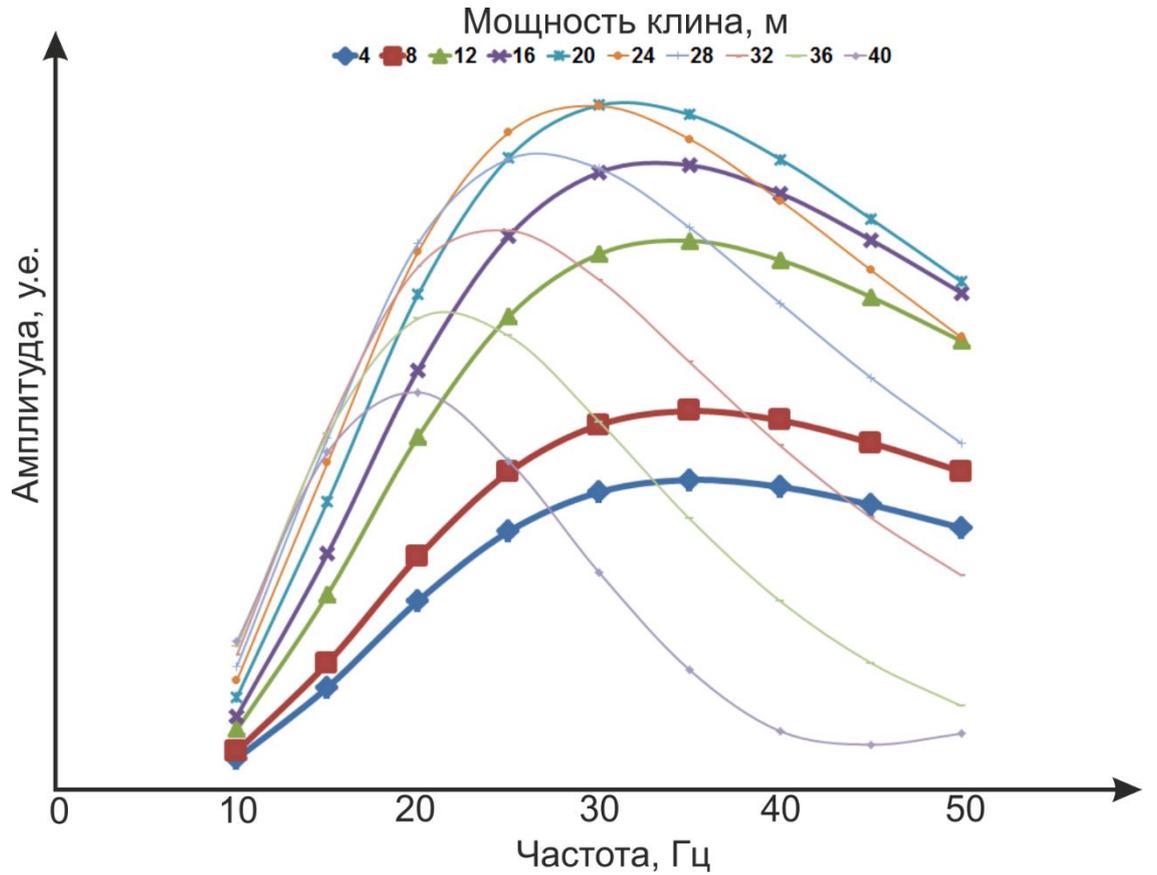


Рис. 34 Изменение спектральной характеристики пласта в зависимости от мощности (сверху), зависимость доминантной частоты спектра НВП от мощности пласта (снизу)

Проведенный анализ показывает, что метод спектральной декомпозиции позволяет решать не только задачу пространственной локализации интерферирующих объектов, но и создает предпосылки для использования спектральных характеристик с целью прогнозирования эффективной толщины по доминантному значению гармоник, что может выражаться в преобладании той или иной частотной компоненты в рамках алгоритма RGB-смешивания.

Глава 4. Практическое применение метода спектральной декомпозиции на реальных материалах.

В данной главе рассмотрены основные подходы к использованию спектральных характеристик на примере реальных сейсмических данных, полученных в пределах одного из нефтяных месторождений Ноябрьской зоны Западной Сибири. Решение поставленной задачи позволит выработать оптимальные алгоритмы использования спектральных данных, а также изучить внутреннее строение продуктивного комплекса и оценить перспективы его разработки. Наличие детальной информации о внутреннем строении позволяет во много раз снизить геологические риски при бурении эксплуатационного фонда скважин.

Геологическое описание объекта изучения, а также информация по имеющимся геолого-геофизическим данным представлены в Главе 1.

В рамках изучения строения ачимовской толщи для решения поставленных практических задач были рассчитаны наборы кубов амплитуд для отдельных гармоник в диапазоне частот 5-50 Гц с шагом 5 Гц. При реализации спектральной декомпозиции в качестве основного был выбран алгоритм непрерывного вейвлет-преобразования с использованием вейвлета Риккера. Подобное решение основано на теоретических предпосылках, описанных в Главе 2.

С целью обоснования применимости и корректности результатов НВП на практическом примере были также рассчитаны спектральные характеристики по алгоритму быстрого преобразования Фурье (БПФ). Особенностью декомпозиции БПФ, как отмечалось в Главе 2, является необходимость использования локального окна, в котором выполняется расчет. Данный факт возникает вследствие специфики функций, применяющихся в рамках указанного метода. Разложение ведется по ряду бесконечных гармонических функций заданной частоты.

В рамках декомпозиции БПФ были заданы окна расчета 28, 65 и 100 мс, в которых оценивались амплитудные характеристики для частот 15, 25 и 35 Гц.

Использование узкого окна приводит к некорректной оценке спектральных характеристик, так как ширина окна меньше, чем период анализируемых гармоник. Результирующая карта характеризуется отсутствием цветовой дифференциации, что снижает информативность результата. Применение широкого окна (100 мс) значительно уменьшает информативность спектральной карты. Оптимальный результат декомпозиции БПФ получен с использованием окна шириной 65 мс, однако итоговая карта является менее детальной по сравнению с результатом, полученным с использованием НВП (рис. 35).

Результаты сравнения разных методик декомпозиции подтверждают тезис о большей эффективности непрерывного вейвлет-преобразования для анализа сейсмических данных. Данная технология позволяет получить корректную оценку спектральных характеристик, что с практической точки зрения приводит к более детальному результату спектрального анализа. Полученные выводы в целом согласуются с результатами исследования, представленными в статье [10].

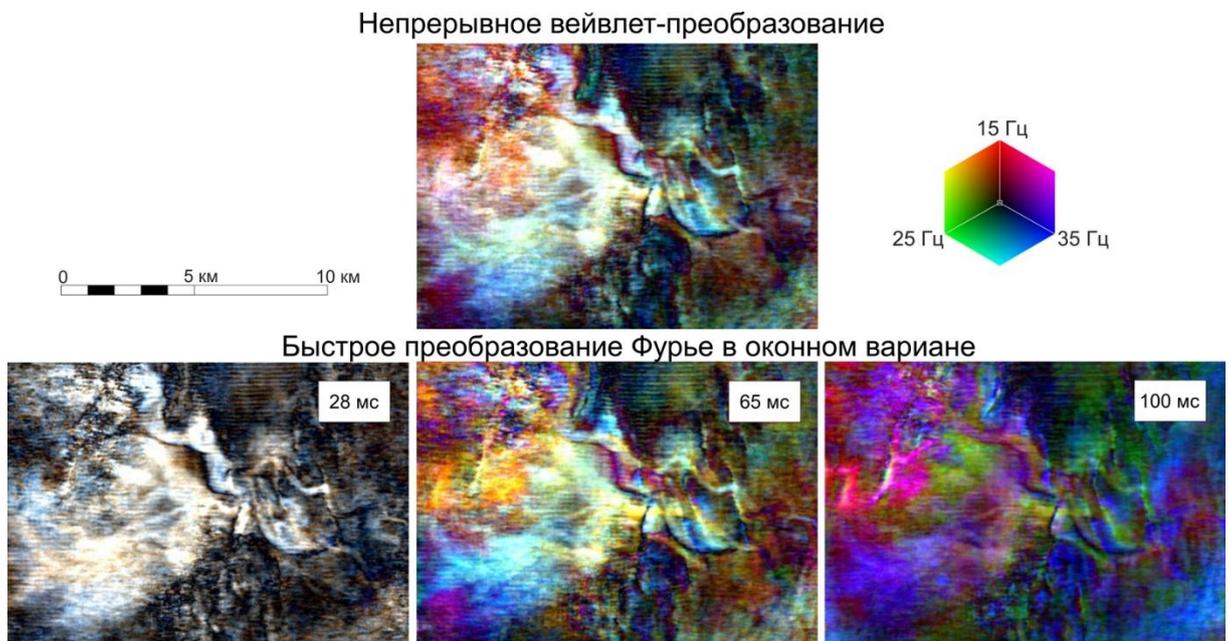


Рис. 35 Сравнение RGB-карт, полученных по НВП (наверху) и преобразованию Фурье с различной длиной оконной функции (внизу)

При НВП определяющим фактором является выбор вейвлета, так как он выступает базисом разложения. В случае синтетических данных, рассмотренных выше, моделирование и разложение выполнялось по одному семейству вейвлетов Риккера. Однако при разложении реальных волновых полей вопрос выбора вейвлета становится более актуальным. С целью определения наиболее оптимального вейвлета было выполнено сравнение трех разложений по сигналам Гусса, Риккера и Морле. Для этого были построены RGB-карты по целевому интервалу разреза для одних и тех же значений частотной характеристики – 15, 25 и 35 Гц (рис. 36).

Как видно из сравнения, наиболее информативный результат, с точки зрения выделения геологических объектов, был получен при использовании сигнала Риккера. Исходя из полученных данных, дальнейшее НВП проводилось с использованием вейвлета Риккера

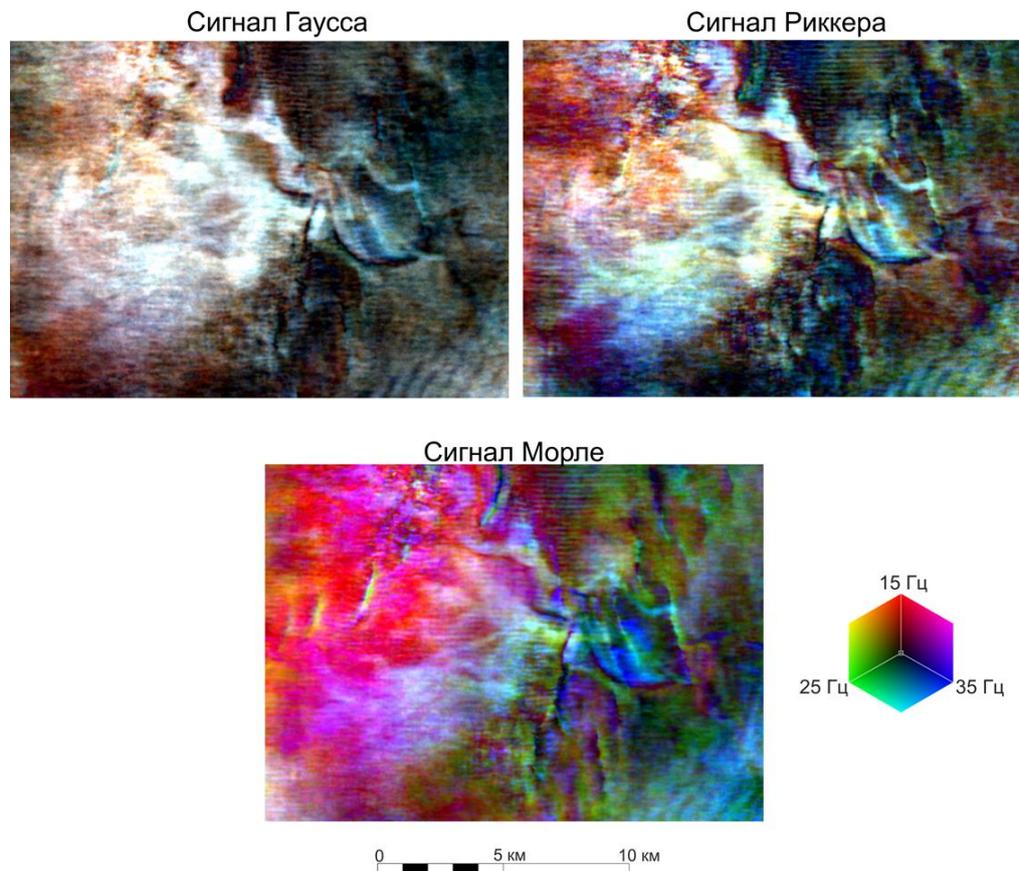


Рис. 36 Сравнение RGB-карт, полученных по спектрам НВП с различными вейвлетами

4.1 Анализ полученных спектральных данных

В результате применения непрерывного вейвлет-преобразования к волновому полю исходный суммарный куб раскладывается на множество кубов, описывающих амплитудные характеристики отдельных частот. Таким образом, возникает задача анализа и интерпретации многомерной информации, так как каждый временной дискрет, после выполнения НВП, характеризуется несколькими значениями амплитуды в зависимости от количества анализируемых частотных характеристик.

В рамках алгоритмов анализа спектральной информации можно выделить два основных класса: первый класс описывает технологии качественного анализа и визуализации, второй класс включает в себя технологии количественной оценки спектральных параметров. Описание технологий, входящих в каждый класс, приведено в таблице 5.

Таблица 5

Рассматриваемые технологии интерпретации спектральных данных

Технологии качественного анализа и визуализации	Технологии количественной оценки
RGB-визуализация	Оценка спектральных характеристик волнового поля
Технологии объемной интерпретации RGB	Оценка затухания спектральных характеристик
Методы кластерного анализа	Оценка доминантного значения частоты
	Оценка главной компоненты спектральной кривой

В ходе анализа эффективности применения спектральных характеристик, в рамках данного исследования, был разработан новый метод представления

спектральных данных НВП, который заключается в получении частотного псевдо-куба по анализируемому отражению, что получило название: атрибут «спектральная кривая» (рис. 37-38).

Технология получения спектральной кривой может быть описана следующим алгоритмом:

- Выполнение спектральной декомпозиции НВП с шагом по частоте 1 Гц в интервале 8-52 Гц;
- Оценка распределения частот по заданной поверхности
- Формирование нового куба данных из карт по поверхности, с вертикальной осью частот.

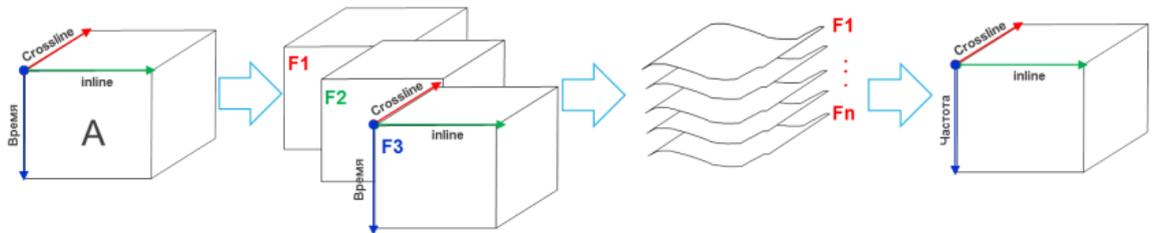


Рис. 37 Алгоритм расчета частотного псевдо-куба

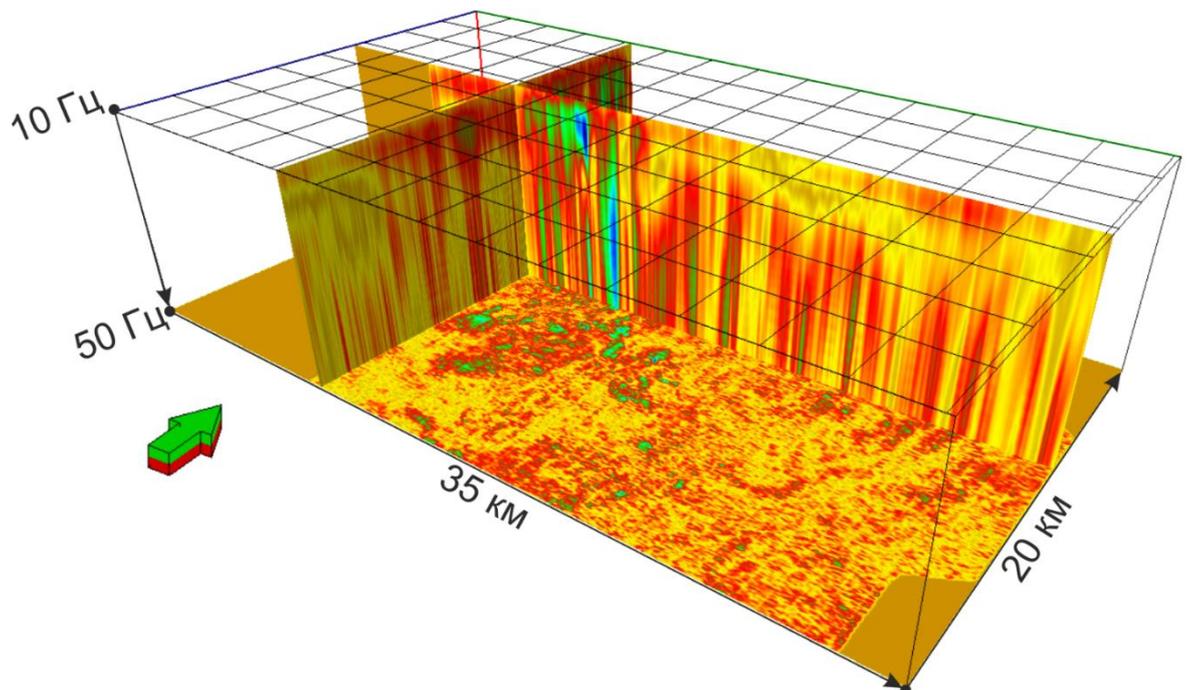


Рис. 38 Пример частотного псевдо-куба для целевого ачимовского пласта

Подобное представление спектральной информации позволяет синхронно анализировать полную спектральную кривую для заданного отражающего горизонта, что дает возможность использовать различные методики многомерного анализа, такие как кластерный анализ и метод главных компонент, для оценки частотных особенностей. Технология отображения разработана автором диссертации в Научно-Техническом центре «Газпром нефть», совместно с ведущим экспертом Департамента геологии и разработки Ф. В. Красновым.

4.2 Технологии качественного анализа и визуализации спектральных данных.

Основной целью применения данных технологий является выделение целевых геологических объектов на основании анализа спектральных данных. Наиболее распространенными алгоритмами в рамках данного класса технологий интерпретации являются RGB-смешивание, объемная интерпретация, а также методы кластерного анализа.

4.2.1 Технология RGB-визуализации

На сегодняшний день данная технология является наиболее используемой при интерпретации результатов спектральной декомпозиции.

Принцип работы технологии RGB-визуализации подробно описан в главе 2.2.4. В рамках раздела необходимо остановиться на практических результатах использования данной методики визуализации. Для построения RGB-карты были

выбраны спектральные характеристики вдоль отражающего горизонта для частот 15, 25 и 35 Гц. Далее приведен детальный анализ полученных RGB-данных.

Спектральная карта цветового комбинирования (рис. 39) в деталях отражает изменение обстановок седиментации пласта на изучаемой площади. Юго-восточная часть представлена отложениями палеошельфовой террасы, при этом граница палеошельфа однозначно фиксируется на спектральной карте. Выдержанное значение амплитуд спектральных характеристик выражается в устойчивом цвете RGB-образа на полученной карте, что отражает спокойные условия седиментации без генерации локальных интерферирующих геологических тел. Данная область с учетом ранее полученных результатов палеогеографического анализа может быть отнесена к шельфовым условиям седиментации.

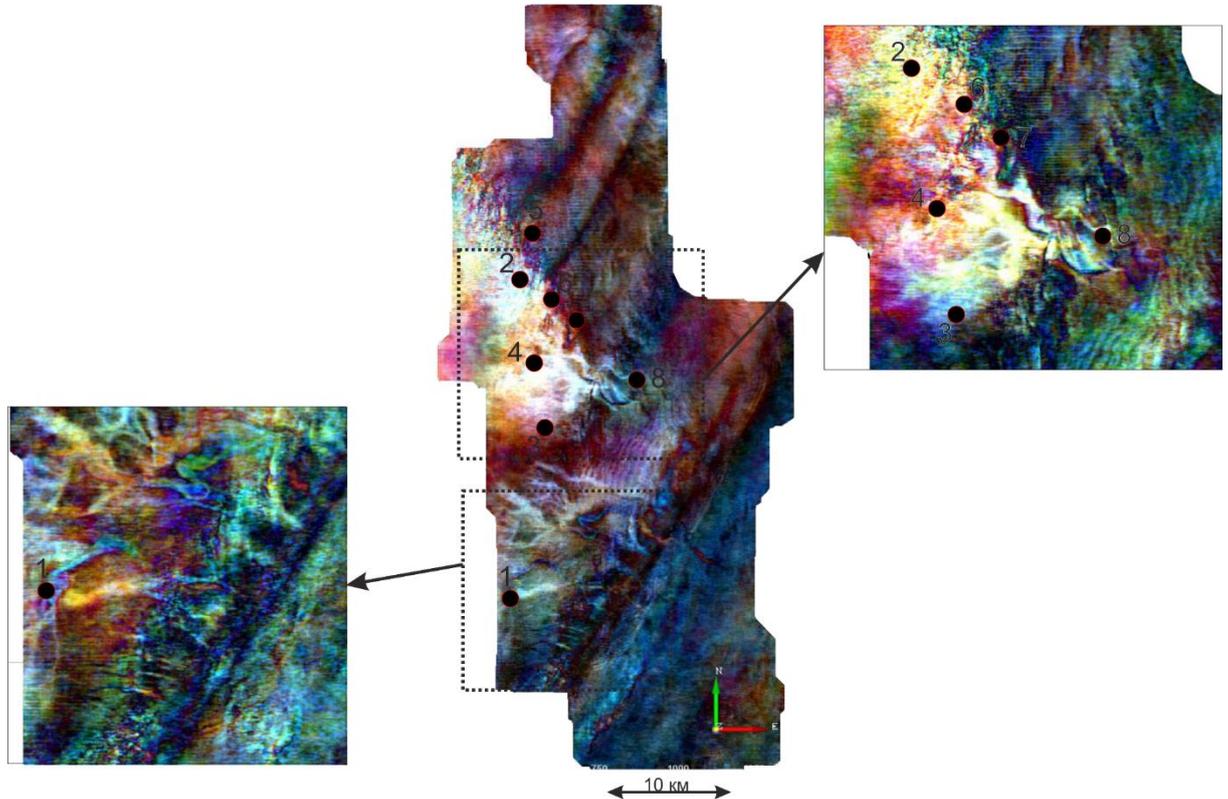


Рис. 39 Спектральная карта цветового комбинирования для частот 15-25-35 Гц

В юго-западной части изучаемой территории наблюдается аномальная область, в которой фиксируется наличие большого количества каналов сложной конфигурации, промывающих бровку палеошельфа. Палеоканалы

характеризуются сложной морфологией, что характеризует активную гидродинамическую обстановку их образования. Характерная ширина каналов составляет от нескольких десятков до сотен метров, при этом наблюдаются как линейные, так и морфологически сложные каналы. Данные геологические объекты являются путями транспортировки осадочного материала, выносимого с палеошельфа, и перспективны с точки зрения наличия коллектора.

В центральной части изучаемой площади наблюдается область интенсивных площадных спектральных аномалий, отвечающая развитию конусов выноса. На основании анализа спектральных RGB-карт появляется возможность с высокой степенью детальности определить не только наличие конусов выноса и подводных каналов, но также и восстановить их внутреннее строение.

Использование RGB-образа позволяет установить наличие большого количества внутренних каналов, по которым происходило перераспределение осадочного материала в рамках конуса выноса. Внутренние каналы характеризуются максимальными значениями спектральных аномалий, что дает возможность детально восстановить их конфигурацию. Изменение цвета спектральной аномалии внутри конуса указывает на возможное изменение мощности объекта; так, например, в южной части конуса наблюдается преобладание высоких частот, что может указывать на область выклинивания геологического тела.

Помимо внутреннего строения конусов выноса полученные спектральные карты позволяют установить сложное взаимоотношение между двумя конусами, развивавшимися в различное геологическое время. Южный конус расположен ближе к шельфовой области и характеризуется более расчлененным строением – наличием тонких внутренних каналов сложной конфигурации. На южный конус с частичным перекрытием накладывается более поздний северный конус выноса. При этом детальность спектральной информации позволяет определить подошву размывающего канала, по которому происходила транспортировка осадка (рис. 40). Исходя из отличий в спектральных характеристиках подошвы канала, можно предположить, что размывающий поток является гидродинамически несвязанным

с основным телом южного конуса. Подобная информация является определяющей при планировании дальнейшей разработки данного региона.

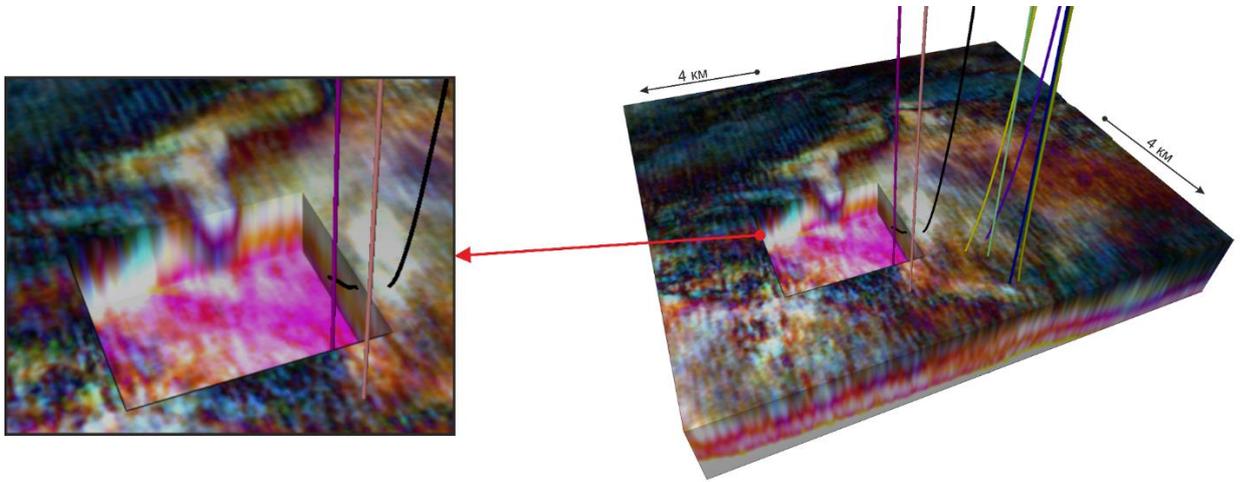


Рис. 40 Отображение размывающего потока на RGB-кубе: общий трехмерный план с вынесенными траекториями скважин (справа) и детализированный участок (слева).

Сравнение со стандартной методикой анализа

Применение метода спектральной декомпозиции с последующим цветовым комбинированием в условиях ачимовских пластов позволяет значительно повысить информативность результатов интерпретации волнового поля по сравнению со стандартным подходом, основанным на оценке распределения амплитуд волнового поля вдоль рефлектора.

Карта амплитуд волнового поля в области развития площадных конусов выноса позволяет оконтурить их в общих чертах (рис. 41). Точное положение границы конусов, также как и их внутренняя структура, остаются неизвестными. Использование подобной карты для целей заложения эксплуатационного бурения невозможно ввиду высокой степени неопределенности.

Более сложные алгоритмы анализа волнового поля, такие, например, как инверсионные преобразования, также не позволяют получить удовлетворительного результата. В качестве подтверждения данного тезиса приведено сравнение карты акустической жесткости в узком окне и карты

цветового комбинирования спектральных гармоник (см. рис. 41). Как видно из сравнения, спектральные данные позволяют получить значительно более детальное представление о внутреннем строении целевого объекта.

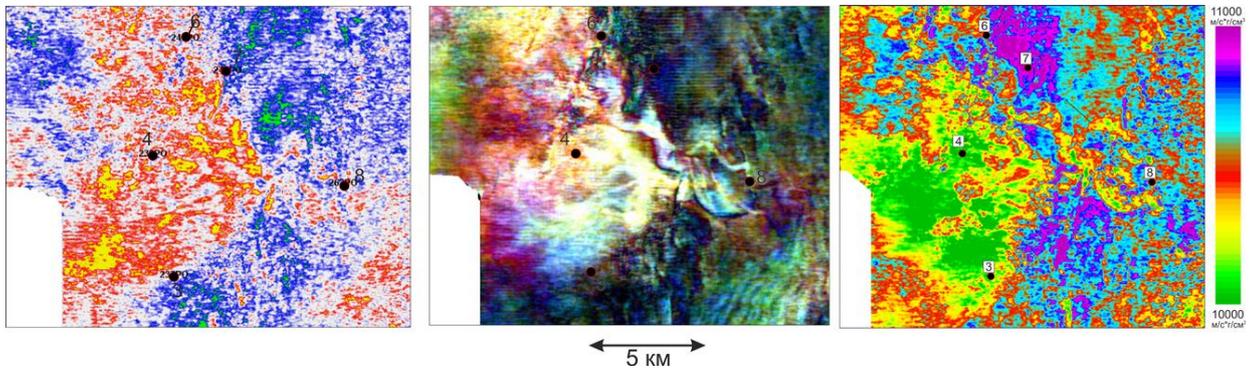


Рис. 41 Сравнение карт: амплитуд (слева), RGB (в центре), акустической жесткости (справа).

Сравнение стандартного и спектрального подходов для области распространения системы палеоканалов в южной части площади показывает низкую степень применимости стандартного подхода для восстановления внутреннего строения продуктивного пласта. Распределение амплитуд в большинстве областей носит хаотичный характер и не позволяет установить наличие палеоканалов (рис. 42).

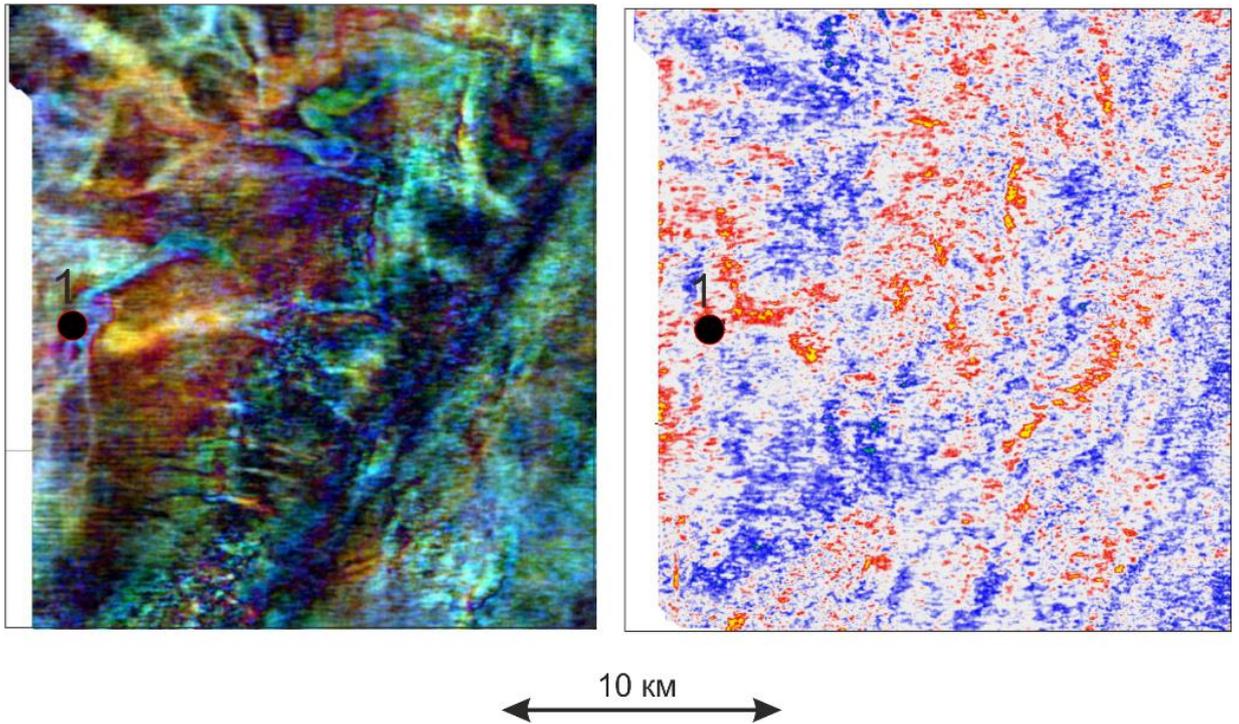


Рис. 42 Сравнение карт: RGB (слева), амплитуд по целевому пласту (справа).

Таким образом, можно сделать заключение, что спектральный подход к анализу волнового поля в условиях ачимовских коллекторов в значительной степени превосходит по информативности стандартные методики анализа волнового поля. Детальность RGB-карт делает спектральную декомпозицию эффективным инструментом для определения внутреннего строения ачимовских пластов.

Обоснование оптимальных параметров цветового комбинирования.

Алгоритм цветового комбинирования подразумевает использование трех спектральных массивов для создания единого RGB-образа. Поэтому для применения данного алгоритма необходимо определение критериев для выбора гармоник, участвующих в схеме цветового смешивания. Для определения наиболее оптимального сочетания гармоник было использовано синтетическое волновое поле, полученное на модели выклинивающегося пласта (см. Глава 2).

В рамках исследования был использован набор спектральных характеристик в диапазоне 10-50 Гц; данный диапазон полностью описывает имеющееся синтетическое поле с доминантной частотой 30 Гц. Для обоснования оптимальной

схемы RGB-смешивания был выполнен расчет множества RGB-карт, анализ карт также подкреплялся графиками амплитудных характеристик для более наглядного понимания закономерностей изменения спектра (рис. 43).

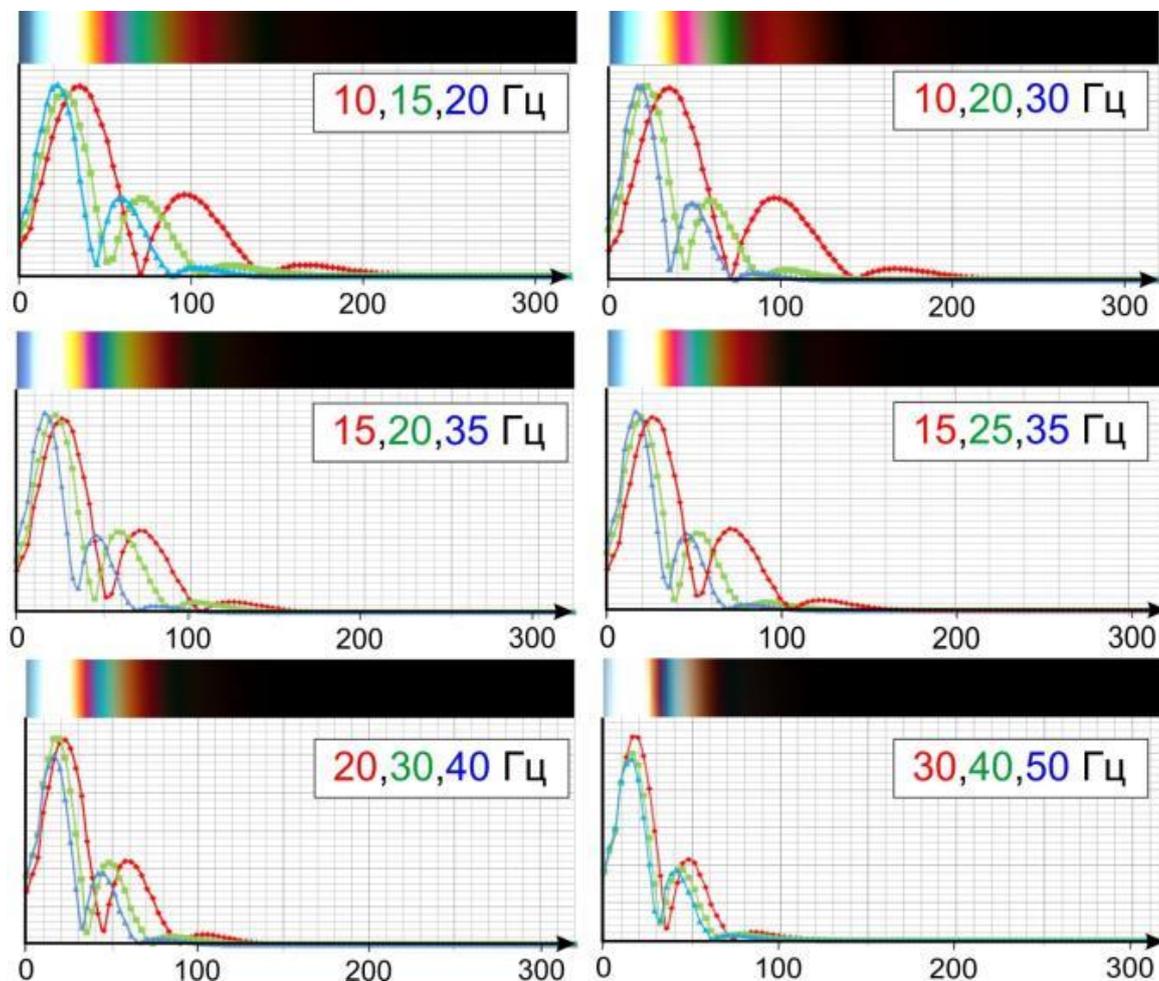


Рис. 43 Графики амплитудных характеристик спектральных компонент в рамках RGB смешивания

На рис. 43 показана серия планшетов, сочетающих в себе нормированные амплитудные характеристики по трем, входящим в схему смешивания, гармоникам. Цвет графика соответствует цветовому каналу, использованному в рамках алгоритма. В верхней части показана результирующая цветовая комбинация, полученная по синтетическому волновому полю. Данная RGB-комбинация отражает изменения амплитудной характеристики в зависимости от мощности выклинивающегося пласта. Как видно из совместного анализа графиков и RGB-среза, результирующий цвет аномалии определяется сочетанием трех

спектральных характеристик – доминантная полоса частот определяет цветовой отклик аномалии. При сочетании максимальных характеристик по всем трем гармоникам, наблюдается белый цвет аномалии, минимальные значения приводят к темным откликам на RGB-срезе. При рассмотрении области выклинивания, приводящей к частичной интерференции сигналов от кровли и подошвы (менее 50 мс) можно установить закономерную смену гармоник: чем меньше мощность пласта, тем выше частота доминирующей гармоники. Этот факт приводит к закономерной смене цветового отклика RGB-смешивания. Цвета аномалий при уменьшении мощности сменяются от красного оттенка к синему, яркость аномалий при этом зависит от нормировки спектральных карт. Очевидно, что степень цветовой дифференциации будет зависеть от разницы между главными максимумами, то есть от анализируемой частоты. Как было показано ранее, положение максимумов прямо пропорционально периоду анализируемой гармоники. Побочные максимумы в области значительных толщин пласта, также хорошо видны на синтетической модели, однако, на реальных данных, вероятнее всего, они не будут проявляться ввиду слабой выраженности.

Подобные планшеты были получены для всех рассматриваемых далее частотных комбинаций, однако приведение их в тексте диссертации можно считать излишним, иллюстрации будут ограничены результирующим RGB-срезом.

Для структурированного изучения особенностей RGB-откликов в зависимости от мощности пласта были составлены комбинации частот в диапазоне 10-50 Гц с шагом 5, 10, 15 и 20 Гц – всего 16 карт RGB (рис. 44).

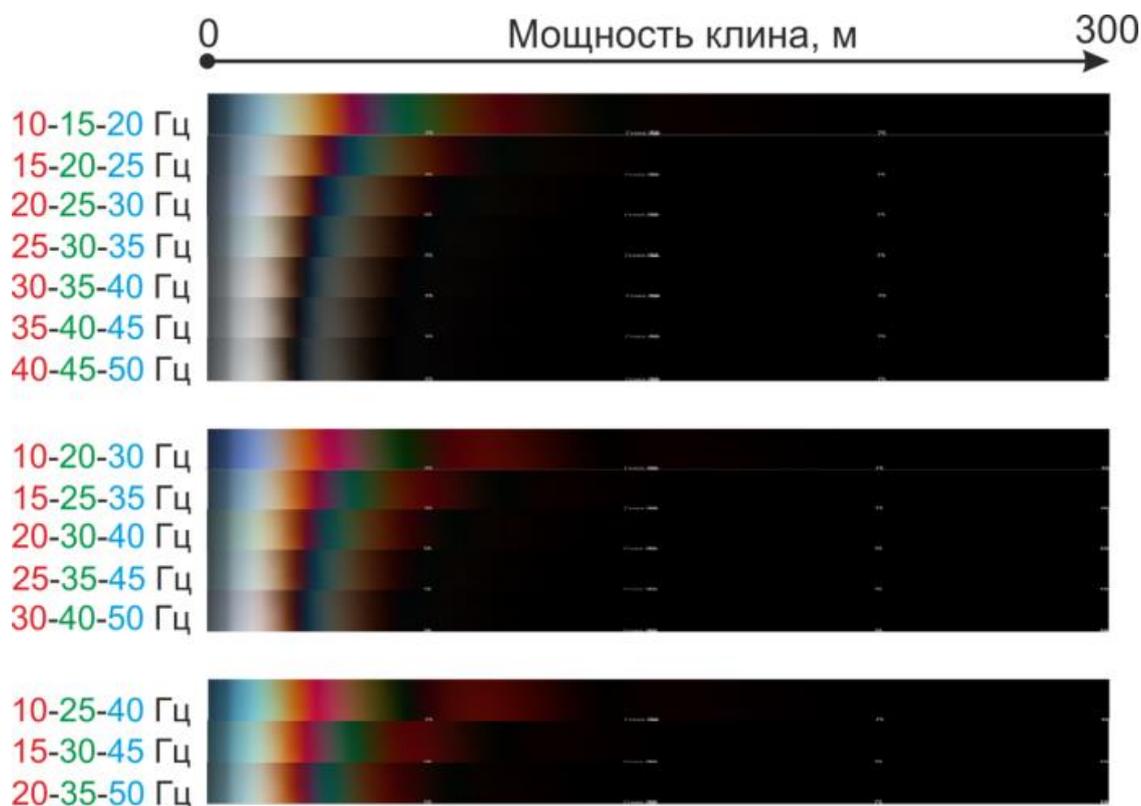


Рис. 44. Сравнение RGB-откликов для разных сочетаний частот в зависимости от мощности клина

Анализ полученного материала позволяет выявить несколько закономерностей в изменении цветовых аномалий. Использование малого шага между частотами, участвующими в алгоритме смешивания, обуславливает быструю потерю цветовой дифференциации. Ввиду малого шага по частотам (5 Гц), отличия между амплитудными характеристиками гармоник оказываются незначительными, что приводит к низкой дифференциации объектов на карте. Увеличение шага между частотами (10-20 Гц) позволяет сохранить цветовую выразительность карт, что, очевидно, положительно влияет на результаты RGB-анализа.

Другой особенностью является ограничение по нижней частоте. Использование низкочастотных характеристик, приводит к слишком широкой аномалии, что в конечном итоге выражается в потере детальности спектральной RGB-карты. Нижнее значение частоты, вероятно, может быть ограничено значением около 15 Гц – в этом случае длина вейвлета сопоставима с половиной

Дополнительным аргументом в пользу ограничения высокой частоты значением 40 Гц может служить анализ двумерного спектра, полученного по модели, и отражающего изменение амплитудных характеристик разных частот в зависимости от мощности клина (рис. 46). Как видно из приведенного трехмерного графика, частоты выше 40 Гц остаются практически неизменными, что приводит к крайне малым отличиям в спектральных откликах. Таким образом, верхнее значение частоты может быть ограничено последней информативной гармоникой волнового поля, что определяется качеством имеющихся данных и шириной спектра записи. Универсальным решением данного вопроса может служить выбор 35-40 Гц, так как данный диапазон гармоник зачастую имеет высокие соотношения сигнал/шум.

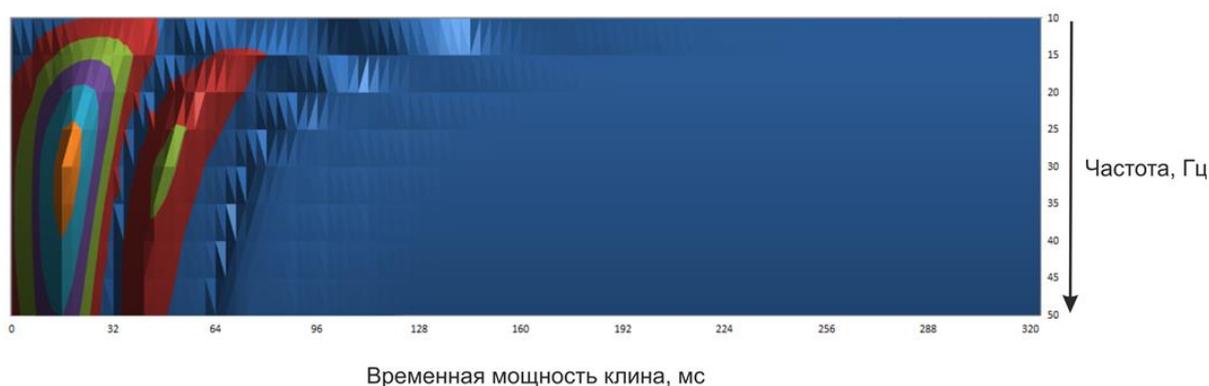


Рис. 46 Двумерный спектр, описывающий изменение амплитуд частотных характеристик в зависимости от мощности клина

В результате выполненного исследования в каждой группе наборов RGB-комбинаций были выбраны наиболее представительные сочетания частот, обеспечивающих максимальную цветовую дифференциацию и детальность. Всего выбрано шесть комбинаций: 15-20-25, 15-25-35, 15-30-35, 20-25-30, 20-30-40, 20-35-50. Для определения наиболее оптимального сочетания было принято решение использовать данные комбинации на реальных данных для более полного понимания различий, возникающих при разных комбинациях гармоник (рис. 47).

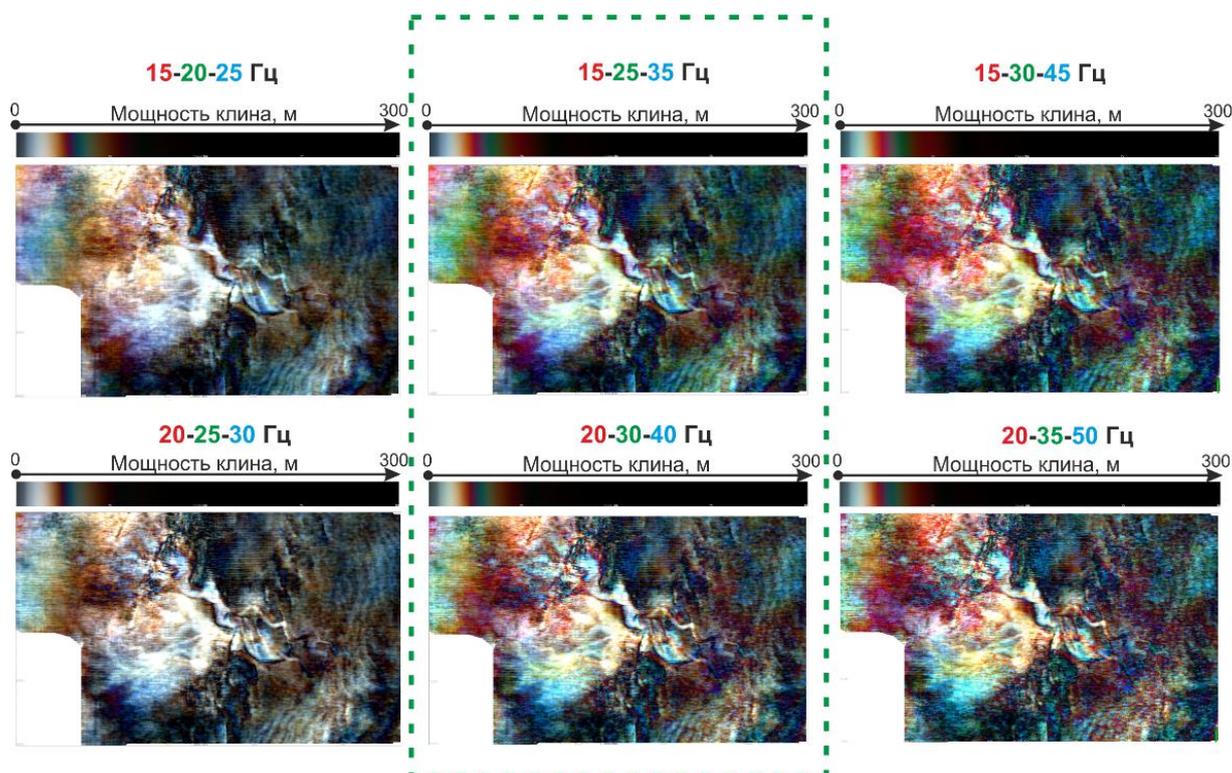


Рис. 47 Сравнение RGB-карт целевого отражения при разных сочетаниях частот.

Полученный результат позволяет определить наиболее оптимальные комбинации: 15-25-35 и 20-30-40 Гц. Сочетания с малым шагом между частотами приводят к слабой цветовой дифференциации объектов. В случае с более высокочастотными комбинациями наблюдается повышение уровня шумовой компоненты, что может уменьшить информативность итоговых карт.

В результате выполненного исследования сделан ряд рекомендаций, позволяющих наиболее оптимальным образом подобрать частотные гармоники в рамках алгоритма RGB:

1. Расчет гармоник необходимо ограничивать информативной частью спектра.
2. Использование гармоник выше 40-45 Гц не приводит к появлению новой информации ввиду слабых изменений в длительности сканирующего вейвлета. Дополнительным ограничением в повышении точности является рост доли шумовой компоненты в высокочастотной части спектра, что приводит к потере детальности.

3. Нижняя граница информативной гармоник для решения детальных задач может быть определена в районе 15 Гц, т.к. более низкочастотные гармоники характеризуются длительными аномалиями и приводят к потере детальности результирующей карты.

4. Шаг между частотами, участвующими в алгоритме RGB, должен составлять 10-15 Гц; при уменьшении разницы до 5 Гц наблюдается слабая цветовая дифференциация объектов на итоговой RGB-карте.

5. Наиболее оптимальными комбинациями в рамках данного исследования приняты 15-25-35 и 20-30-40 Гц.

В рамках исследования RGB-комбинирования был изучен еще один вопрос: определение закономерности смены цветовых характеристик в зависимости от мощности пласта. Рассмотрим данный вопрос на реальном примере – спектральной RGB-карте для гармоник 20-30-40 Гц (рис. 48). При этом график амплитудных характеристик целесообразно ограничить по временной мощности пласта значением 40 мс, т.к. априорно известно, что изучаемый коллектор относится к категории «тонких слоев», т.е. приводит к интерференции отражений от кровли и подошвы. Поведение гармоник в данном случае носит весьма закономерный характер: чем ниже мощность пласта, тем более высокочастотная компонента выходит в доминантное значение. Таким образом, на изучаемом участке появляется косвенный инструмент, позволяющий прогнозировать изменение толщины пласта. Каналы и устьевая часть конуса характеризуются большей мощностью интерферирующего пласта, в южной части наблюдается преобладание синего оттенка, что позволяет прогнозировать выклинивание конуса выноса в данном направлении.

Таким образом, можно утверждать, что характер цветовой аномалии позволяет судить о мощности изучаемого объекта. Яркость аномалии в свою очередь, как было показано ранее, определяется акустическим контрастом. Изучение закономерностей смены цветовых аномалий и их яркости позволяет косвенно определить свойства геологического тела. Однако в данном случае необходимо учитывать, что яркость аномалии может также определяться и

близостью к интерферирующему телу, что было показано ранее. Поэтому данный алгоритм подразумевает комплексный подход к изучению строения: расчет серии карт или стратиграфических срезов в некотором интервале разреза.

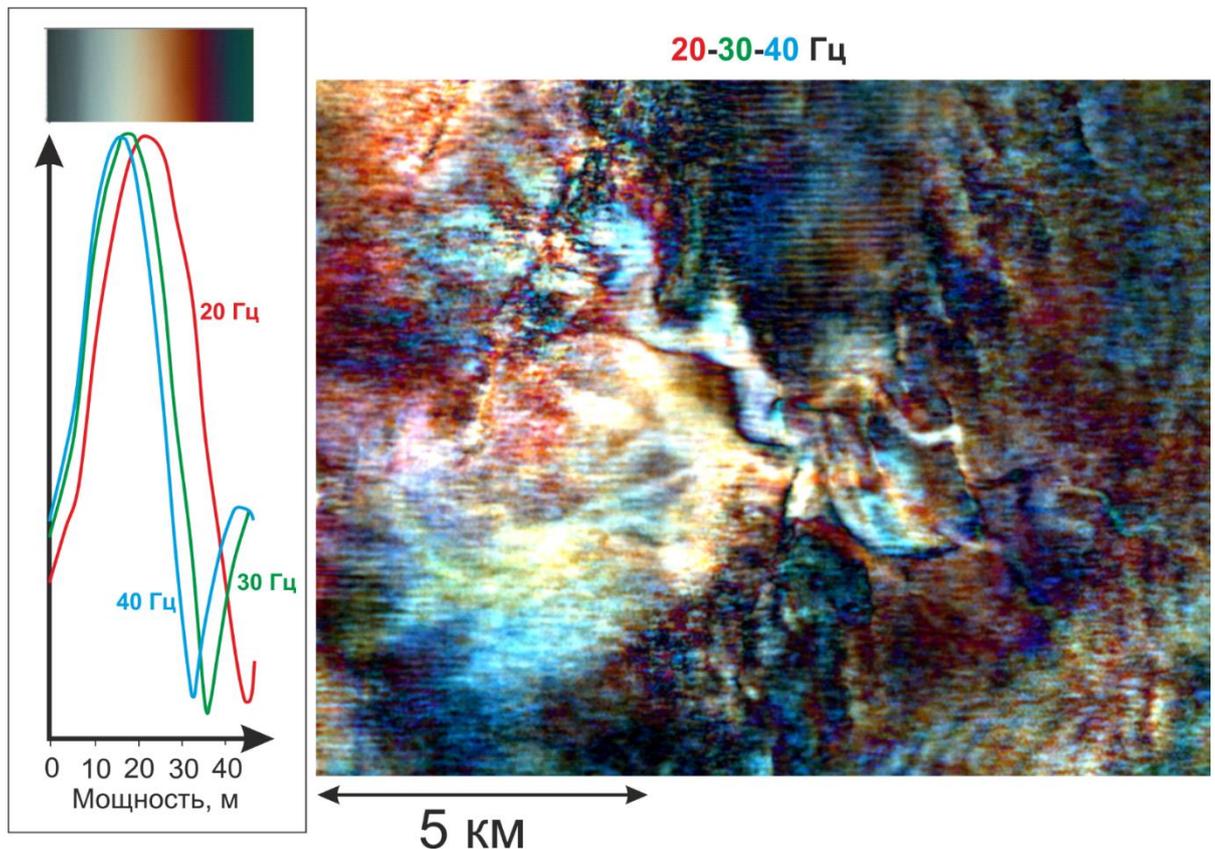


Рис. 48 RGB-карта (слева) и амплитудная схема смешивания частотных характеристик в зависимости от мощности клина (справа)

Линеаризация карт цветового комбинирования

Цветовое комбинирование является достаточно мощным инструментом визуализации, позволяющим одновременно анализировать несколько атрибутов с использованием высокоразрешающей трехмерной палетки. Однако подобный тип анализа данных поддерживается далеко не всеми интерпретационными геолого-геофизическими пакетами, что является довольно серьезной проблемой коммуникации между специалистами, использующими разное программное обеспечение.

Устранение возникающей проблемы использования результатов цветового комбинирования сводится к решению двух задач:

1. Приведение к линейному варианту трехмерного цветового куба, в рамках которого определяется цвет пикселя выходной карты;
2. Расчет линейной комбинации входных атрибутов, которая будет корректно отображаться в новой линейной шкале.

Поставленные задачи были решены в рамках настоящего исследования. Схема линеаризации успешно опробована на практике специалистами компании «Газпромнефть НТЦ».

Первая задача заключается в разложении цветового куба в ряд, который описывает все возможные цветовые комбинации в RGB палетке. Для этого цветовой куб аппроксимируется трехмерной цветовой матрицей размером $11 \times 11 \times 11$. Таким образом, производится дискретизация цветовой палетки для уменьшения ее линейной длины. При этом не происходит потери цветности, так как все современные геолого-геофизические пакеты не требуют задания каждого цвета внутри палетки – они используют только контрольные точки, между которыми производится интерполяция. Исходя из этого данная дискретизация не приводит к потере качества.

Для линеаризации трехмерной палетки цветовой куб разделяется на 11 слоев по значению асимптот (синий цвет), внутри каждого слоя значение синего цвета принимается постоянным. Далее каждый слой разделяется на 11 цветовых полос по оси ординат (зеленый цвет), внутри каждой полосы значение зеленого цвета принимается константой, а значения красного цвета меняются от нуля до максимального значения. Линеаризация палетки заключается в последовательной записи всех цветовых полос. При этом первая полоса меняется от черного (координата $[0;0;0]$) до красного (координата $[1;0;0]$) цвета, а каждая последующая полоса отличается от предыдущей на один дискрет по зеленому цвету. Когда значения зеленого цвета достигнут максимального, производится перемещение на один дискрет по синему цвету и все операции повторяются в той же последовательности (рис. 49). Таким образом, трехмерный цветовой куб

расписывается в цветовой ряд, загрузка которого возможна в большинство современных геолого-геофизических пакетов.

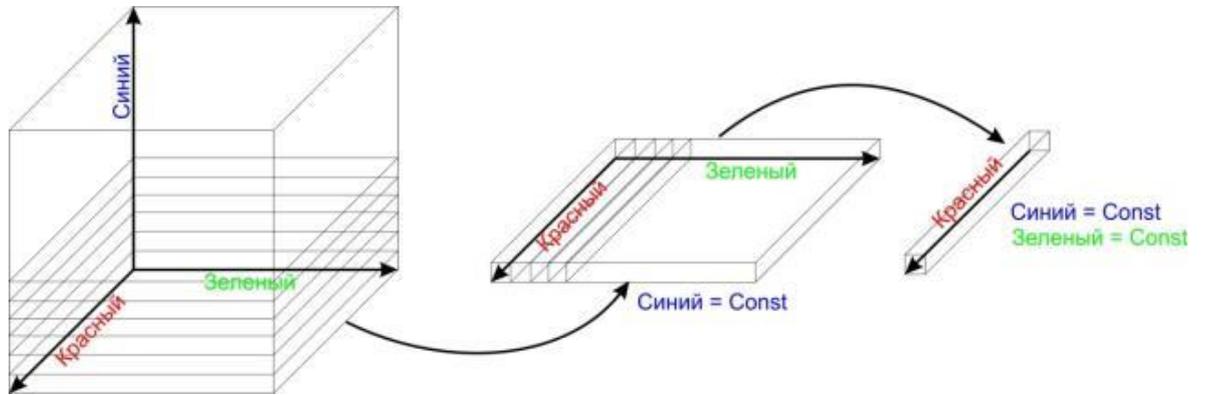


Рис. 49 Схема линейзации трехмерной палетки RGB.

На рис. 50 показан результат линейзации трехмерной цветовой палетки и графическое изображение первых трех цветных слоев, которое позволяет понять последовательность операций для расчета. График отражает последовательность изменения значений цветов по каждому каналу RGB. По оси абсцисс откладывается амплитуда будущей карты, а по оси ординат – значение цвета по каждому каналу. При этом за единицу принимается максимальное значение цвета, а за ноль – минимальное. Таким образом, черный цвет описывается амплитудой 0, которая отражает минимальные значения по всем цветовым каналам, амплитуда 121 соответствует желтому цвету – значение 1 по красному и зеленому каналам, при отсутствии синего цвета, белый цвет соответствует амплитуде 1331 – максимальным значениям по всем трем цветовым каналам.

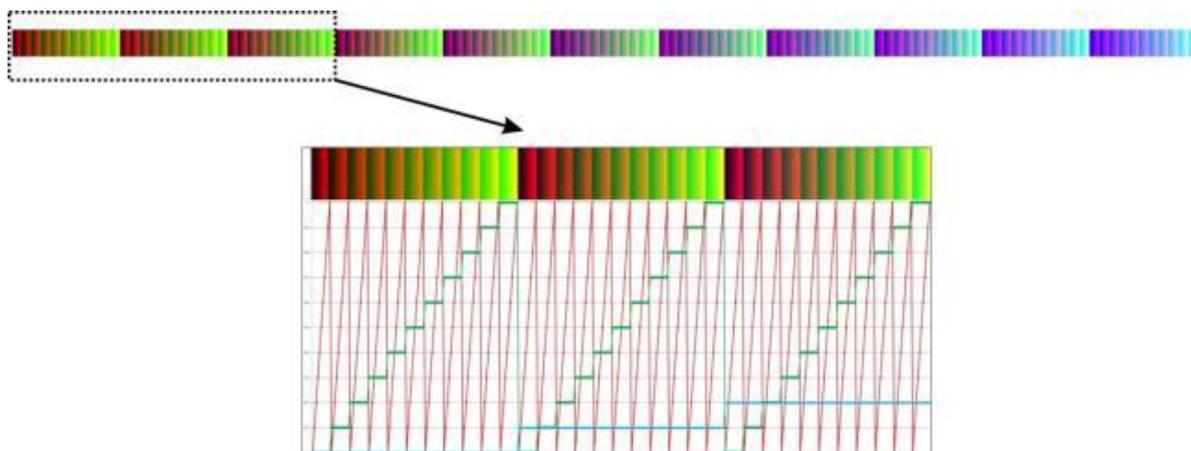


Рис. 50 Результирующая палетка (сверху) и графическое изображение первых трех цветовых слоев (снизу).

Вторая задача заключается в переводе атрибута из вида $F'(x, y, A1, A2, A3)$, когда в каждой точке атрибут определяется совокупностью трех значений, к стандартному виду $F(x, y, B)$, когда в каждой точке атрибут определен единственным значением. Подобная операция сводится к расчету линейной комбинации входных атрибутов, при этом необходимо обеспечить выполнение условия разделения атрибутов по значениям, то есть решение неоднозначности, когда различные сочетания атрибутов «А» могут приводить к одинаковой амплитуде выходного атрибута «В».

В качестве решения задачи линейного комбинирования было подобрано уравнение, позволяющее однозначно решить задачу разделения атрибутов для конкретной палетки RGB:

$$C = R*n^0 + G*n^1 + B*n^2,$$

где C – значение выходного атрибута, R – значение атрибута для красного канала, G – значение атрибута для зеленого канала, B – значение атрибута для синего канала, $n = 11$ – размерность палетки.

Выполнение линейной комбинации входных массивов позволяет получить карту, характеризующуюся диапазоном значений амплитуд 0-1330, что полностью укладывается в рассчитанную ранее линейную палетку. Применение технологии линеаризации цветового смешивания позволяет без значительной потери качества

производить визуализацию мультиатрибутных карт в геолого-геофизических пакетах без поддержки технологии цветового RGB смешивания (рис. 51).

Применение описанной технологии позволило решить проблему линейаризации для основных геолого-геофизических пакетов, используемых в процессе сейсмогеологического моделирования: Petrel (Schlumberger), Hampson-Russell (CGG), GeoMate и NGT Smart. Последние два пакета являются исключительно геологическими, без поддержки анализа и интерпретации сейсмической информации. Как видно из иллюстрации, линейаризация RGB-карт во всех пакетах реализована успешно. Исключение по качеству визуализации составляет NGT Smart, однако корректировка палетки в «ручном» режиме позволяет несколько улучшить результат.

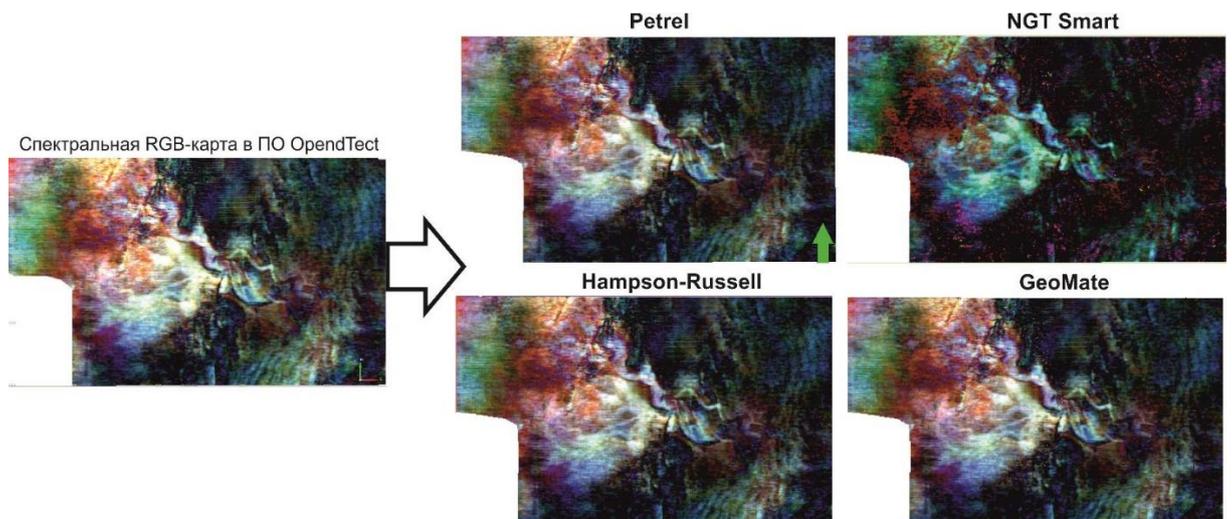


Рис. 51 Сравнение карты RGB-смешивания в ПО OpendTest с ее линейаризованным вариантом в разных программных пакетах.

В результате проведенного исследования была решена задача линейаризации результатов цветового комбинирования, что позволяет выполнять мультиатрибутный анализ с применением алгоритма цветового RGB смешивания. Решена проблема «уникальности» данной технологии, которая требовала наличия специального программного обеспечения для ее выполнения, так как полученные

алгоритмы по расчету палетки и линейного атрибута могут выполняться без привлечения специальных геолого-геофизических пакетов.

Дальнейшее развитие направления линеаризации результатов RGB-смешивания заключалось в получении новых псевдо-трехмерных палеток, которые могут быть использованы в данном алгоритме.

Наиболее простой вариант модификации цветовых схем заключается в перестановке цветовых каналов, что является эквивалентом изменения главной оси линеаризации цветового куба (в исходном варианте главная ось отвечает красному каналу). Другим простым вариантом получения «новой» псевдо-трехмерной палетки является обращение цветовых каналов, при таком преобразовании максимальным амплитудам отвечают наименьшие значения насыщенности цветом по соответствующему каналу. Более информативный результат был получен при совместном обращении трех каналов. Обращение одного или двух каналов, приводит к доминированию обращенного цвета в общем фоне результирующей карты (рис. 52).

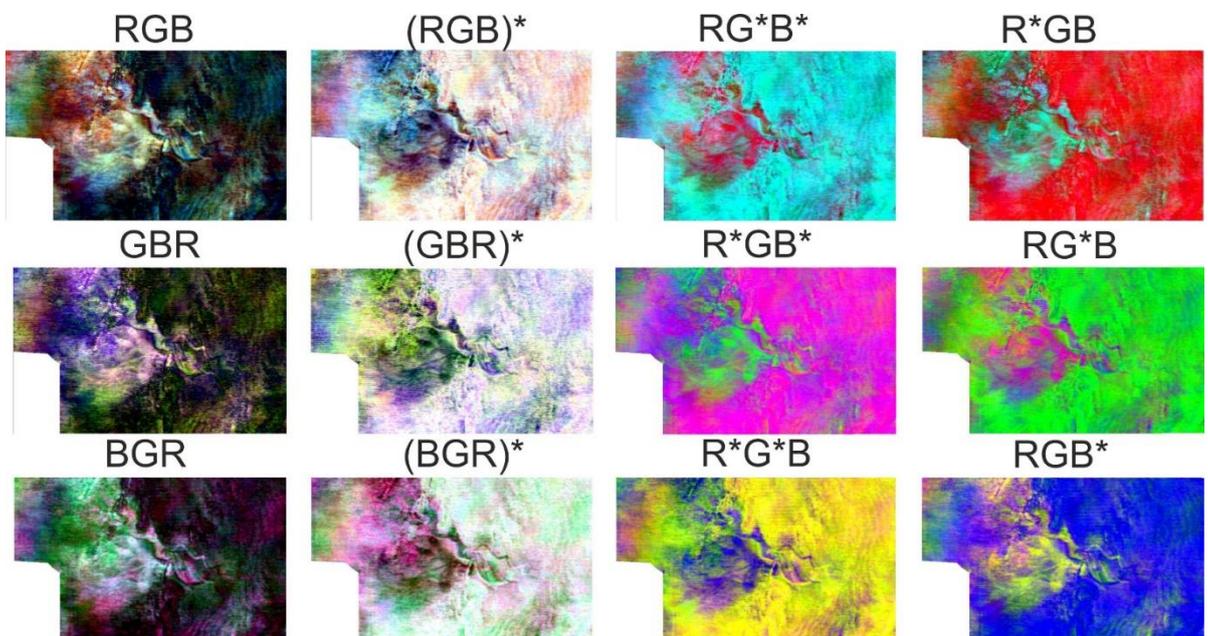


Рис. 52 Рассчитанный набор RGB палеток

В качестве дополнительного способа получения псевдо-трехмерной палетки рассматривалось математическое преобразование цветовых осей. Новые значения

рассчитывались как среднеквадратические по двум исходным цветовым каналам. Принципиальная схема алгоритма подчиняется классической схеме сочетания цветов: сочетание красного (R) и зеленого (G) дает бирюзовый (C), зеленого (G) и синего (B) – желтый (Y), а красного (R) и синего (B) – фиолетовый (M). Таким образом, были получены аналоги палеток семейства «СМУ», однако результат их применения можно оценить как менее информативный, поэтому его дальнейшее применение не рассматривается в диссертации (рис. 53). Наиболее информативной палеткой данного семейства является «RYB» и ее обращенная модификация.

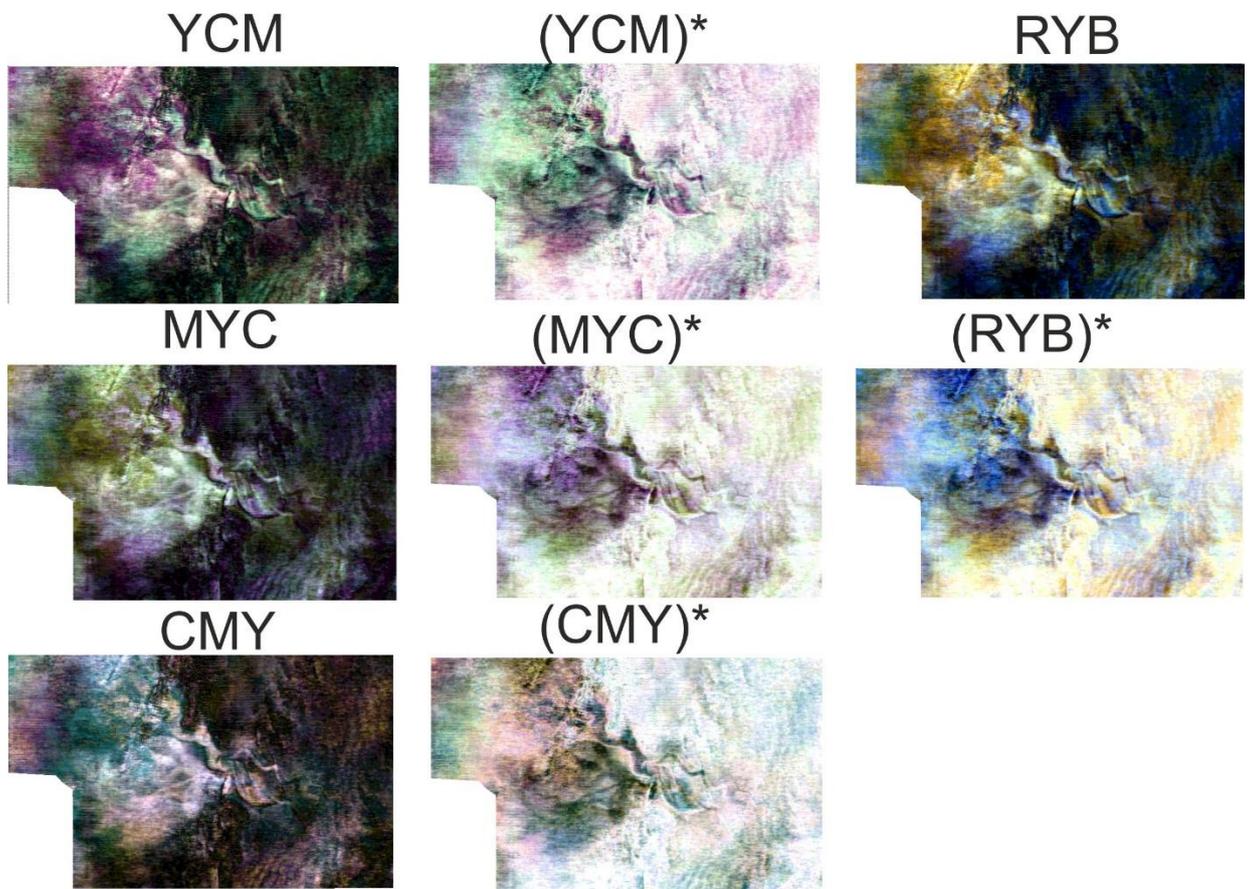


Рис. 53 Рассчитанный набор СМУ палеток

В результате выполненного исследования получена база данных псевдо-трехмерных палеток, насчитывающая более 20 цветовых схем, готовых к импорту в основные геолого-геофизические пакеты.

4.2.2 Технологии объемной интерпретации.

Для корректного распределения свойств в межскважинном пространстве необходимо представление о геометрических характеристиках геологических объектов не только в плане, но также и в объеме.

Для решения проблемы геометризации конуса выноса из спектральных данных возможно использование специальных объектов объемной интерпретации – geobody, представляющих собой определенный объем поля, выделенный по заданному закону.

Полезный, с точки зрения прогноза коллектора, объем сейсмических данных приурочен к спектральным аномалиям, наблюдаемым на картах цветового комбинирования. Для решения поставленной задачи геометризации спектральных аномалий был составлен RGB-куб, по аналогии с картами цветового комбинирования. При этом для выделения аномалий необходимо дополнительно ввести параметр прозрачности, регулирование которого позволяет удалять влияние части данных.

Настройка параметра прозрачности выполняется по гистограммам распределения амплитуд соответствующих гармоник отдельно для каждой частоты. Заданием прозрачности производится удаление всех дискретов, значение которых попадает в интервал амплитуд ниже порогового значения. Так как целевыми являются аномальные области высоких значений амплитуд гармоник, то в процессе настройки прозрачности удаляются из анализа дискреты малых амплитуд. В результате применения функции прозрачности для каждого спектрального куба, результирующий куб содержит только аномальные дискреты, обусловленные наличием интерферирующего тела в разрезе (рис. 54).

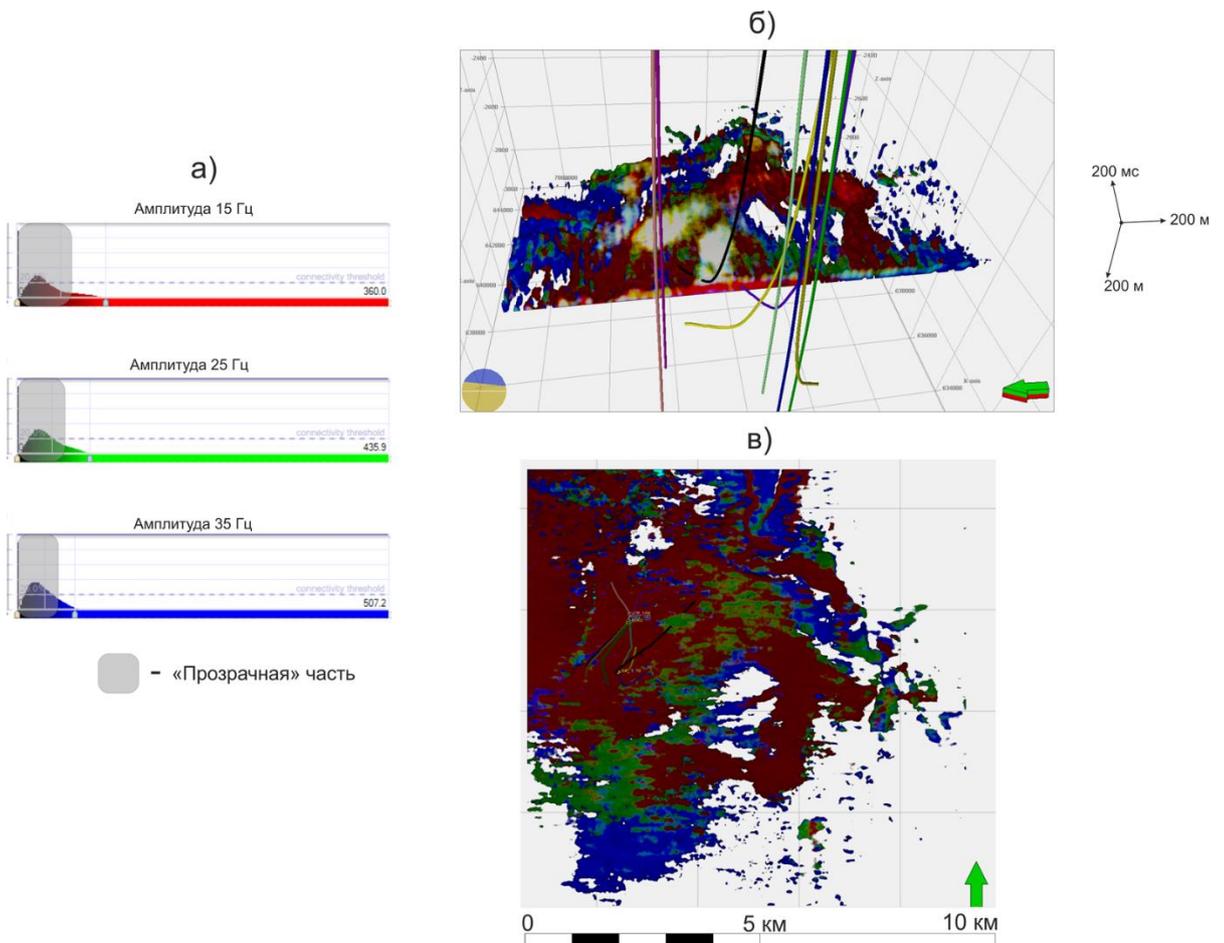


Рис. 54 Процесс выделения целевого тела в рамках объемной интерпретации. а) Настройка параметров прозрачности. б) Трехмерное отображение применения прозрачности (на рисунок вынесены траектории эксплуатационных скважин, выполнено усечение объекта параллельно оси Y). в) Двумерное отображение применения прозрачности.

Дискреты поля, отвечающие аномальной части спектра, в дальнейшем оцифровываются, то есть выделяются как точечные объекты, характеризующиеся тремя пространственными координатами. Такие объекты в дальнейшем можно импортировать в геологическую модель, тем самым ограничить распределение свойств геометрическими рамками (рис. 55).

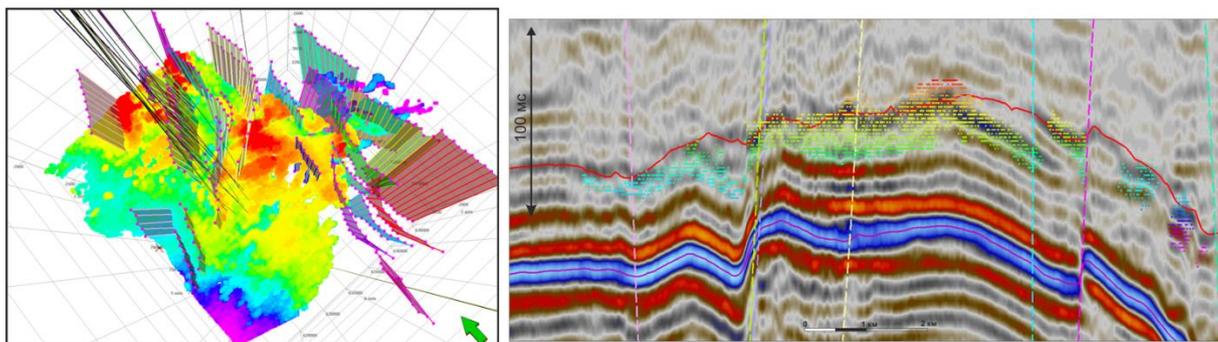


Рис. 55 Выделенный аномальный объем (слева), наложение аномального объема на сейсмический разрез (справа)

Наличие трехмерного тела позволяет построить более корректную геологическую модель, которая описывает пространственное распространение перспективных объектов. Геологическая модель, построенная с привлечением подобной информации, будет характеризоваться значительно большей достоверностью по сравнению с моделями, построенными на основе карт или стохастических распределений.

4.2.3 Методы кластерного анализа

Частотный псевдо-куб (см. раздел 4.1), представляет собой многомерное представление отражающего горизонта в виде набора спектральных кривых. Исходя из подобного описания массива, для его анализа целесообразно применение подходов многомерной статистики. Данное направление анализа направлено на уменьшение размерности массива данных и переход к отображению, которое может быть визуализировано и проинтерпретировано. Одним из алгоритмов, относящихся к области многомерного анализа, является построение самоорганизующихся карт Кохонена (SOM) [29] (рис. 56). SOM представляет собой соревновательную нейронную сеть с обучением без учителя, выполняющую задачу

визуализации и кластеризации, являясь методом проецирования многомерного пространства в пространство с более низкой размерностью.

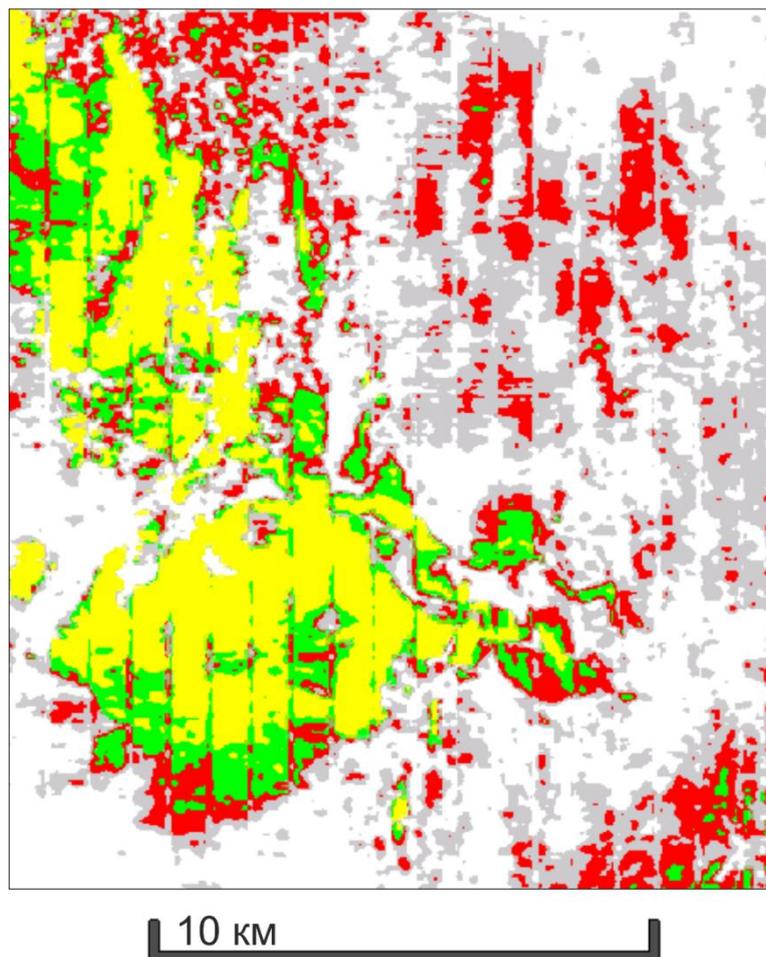


Рис. 56 Пример SOM-карты по частотному псевдо-кубу (цветами показаны разные классы)

Необходимо отметить, что все проанализированные методы качественной интерпретации показывают схожие результаты. RGB-комбинация позволяет восстановить внутренние детали геологического строения, а также получить оценку объемного тела с применением параметра прозрачности, однако в данном случае анализируются только три частоты. Метод кластеризации, несмотря на меньшую детальность, использует для анализа всю спектральную кривую для целевого ОГ, что может дать дополнительную информацию в результатах интерпретации.

4.3 Методы количественной оценки спектральных характеристик

Данный класс методик направлен на количественную оценку параметров продуктивного пласта. Как следует из результатов моделирования, наибольшее влияние на характер спектральных аномалий оказывает мощность пласта, поэтому в качестве прогнозного параметра рассмотрена эффективная мощность коллектора.

Оценка спектральных характеристик

В рамках данного подхода амплитудные характеристики по различным частотам используются как стандартный сейсмический атрибут, то есть выполняется оценка распределения амплитуд вдоль отражающего горизонта по индивидуальным частотам – подобный анализ может быть назван как моночастотный анализ. Как показывают результаты моделирования, поведение частотных характеристик связано с изменением мощности пласта, поэтому данный подход является оправданным с теоретической точки зрения.

Для выполнения подобного анализа был выполнен расчет амплитудных характеристик для частот 10, 15, 20, 25 и 30 Гц. После чего выполнялась оценка связи амплитуды спектральной характеристики и значения эффективной мощности в точке скважины. Для анализа использовался весь имеющийся фонд скважин, вскрывающий целевые ачимовские пласты.

Как показывает результат анализа (таблица б), наибольшая корреляция прогнозного параметра с амплитудной характеристикой наблюдается для частот в районе доминантного значения – 25 Гц (рис. 57). Коэффициент корреляции в данном случае составляет 0.66, что позволяет использовать данную карту как сейсмический тренд при распространении эффективных толщин в геологической модели.

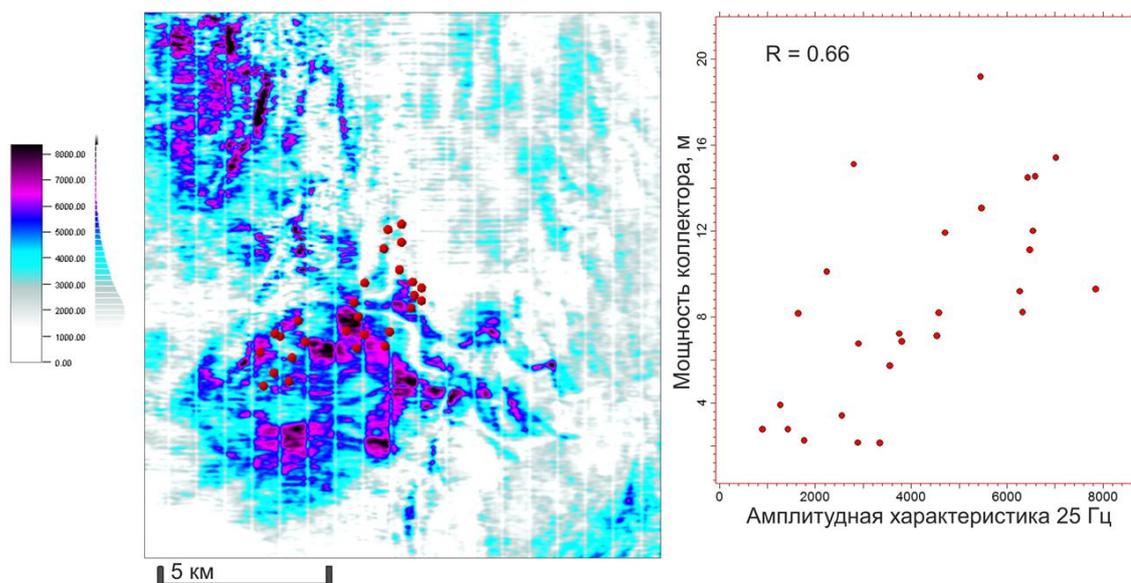


Рис. 57 Карта амплитуд частотной характеристики 25 Гц вдоль целевого отражения (слева), график зависимости амплитуды частотной характеристики 25 Гц от мощности коллектора (справа).

Таблица 6

Коэффициент корреляции между амплитудой частотной характеристики и эффективной мощностью коллектора

Частота, Гц	Ккор (Нэф.)
10	0.26
15	0.44
20	0.60
<u>25</u>	<u>0.66</u>
30	0.62

Оценка затухания спектральных характеристик

Данный подход основан на анализе изменения значения амплитуд между двумя спектральными характеристиками. Практическая применимость подобного подхода подтверждается также публикацией [47].

В рамках исследования были рассчитаны различные разностные характеристики для целевых частот в интервале 10-30 Гц (таблица 7). Для оценки применимости подхода использовался анализ корреляционной связи между разностным параметром и значением эффективной мощности (рис. 58).

Как показывает результат расчетов, разностные характеристики показывают немного лучшую корреляцию с изменением толщин пласта. При этом наличие частотного псевдо-куба, описанного в начале главы, позволяет оперативно получить данную информацию, а также визуально оценить изменчивость частотных характеристик в пространстве.

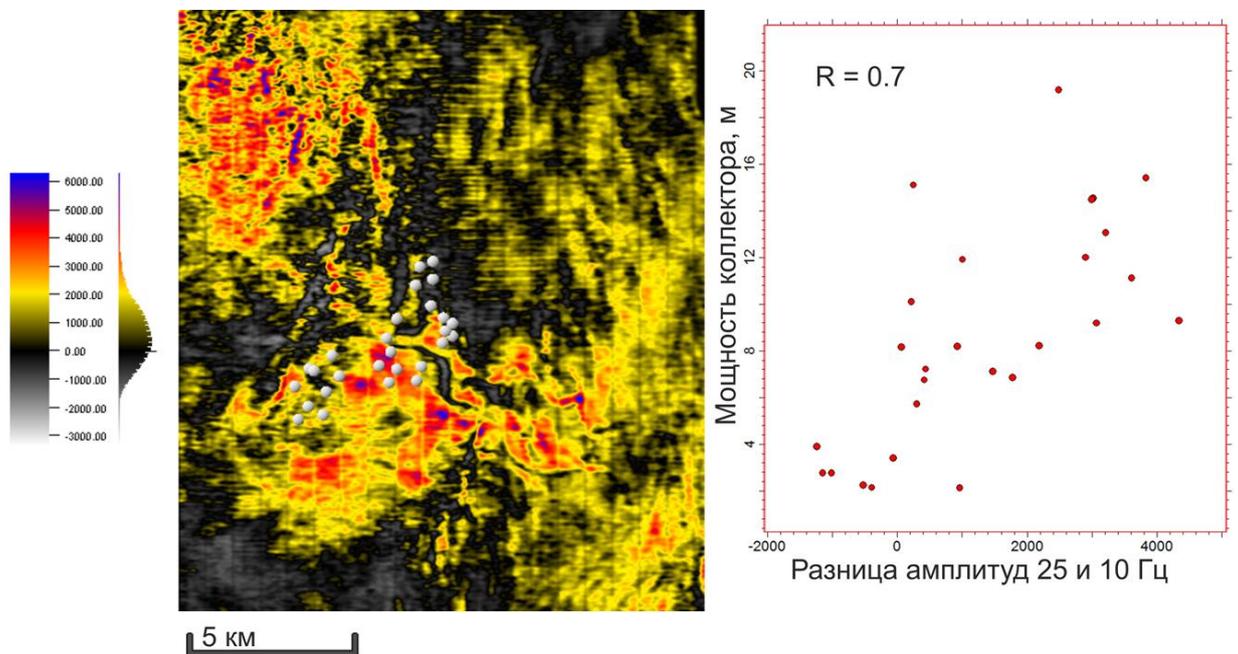


Рис. 58 Карта разницы амплитуд частотных характеристик 10 и 25 Гц (слева), график зависимости разницы амплитуд от эффективной мощности коллектора (справа).

Таблица 7

Коэффициент корреляции параметра затухания от эффективной мощности коллектора

Параметр затухания	Ккор (Нэф.)
15-10 Гц	0.51

20-10 Гц	0.65
20-15 Гц	0.69
25-10 Гц	0.70
25-15 Гц	0.60
25-20 Гц	0.23
30-10 Гц	0.60
30-15 Гц	0.37
30-20 Гц	0.04

Метод главных компонент.

Представление спектральных характеристик в виде частотного псевдо-куба является многомерным описанием рефлектора в частотной области, поэтому для анализа подобной информации целесообразно использовать методы многомерной статистики. Основным направлением многомерной статистики является уменьшение размерности массива с наименьшей потерей информации. Примером подобного алгоритма является метод главных компонент, предложенный К. Пирсоном в 1901 г. Целью применения главных компонент, является аппроксимация многомерных данных линейными многообразиями меньшей размерности. Идея метода заключается в последовательном выявлении направлений, в которых данные имеют наибольший разброс. Подобная задача сводится к вычислению собственных векторов и собственных значений ковариационной матрицы исходных данных [13].

Применение данной технологии к частотному псевдо-кубу позволяет получить на выходе карты заданного количества главных компонент. Таким образом, осуществляется переход от трехмерного куба к набору карт, аппроксимирующих его.

В дальнейшем полученные карты также были использованы для сравнения со значениями эффективной мощности. Как показывает сравнение, корреляция первой главной компоненты с эффективными толщинами оказывается наивысшей из рассмотренных методов – 0.9 (рис. 59).

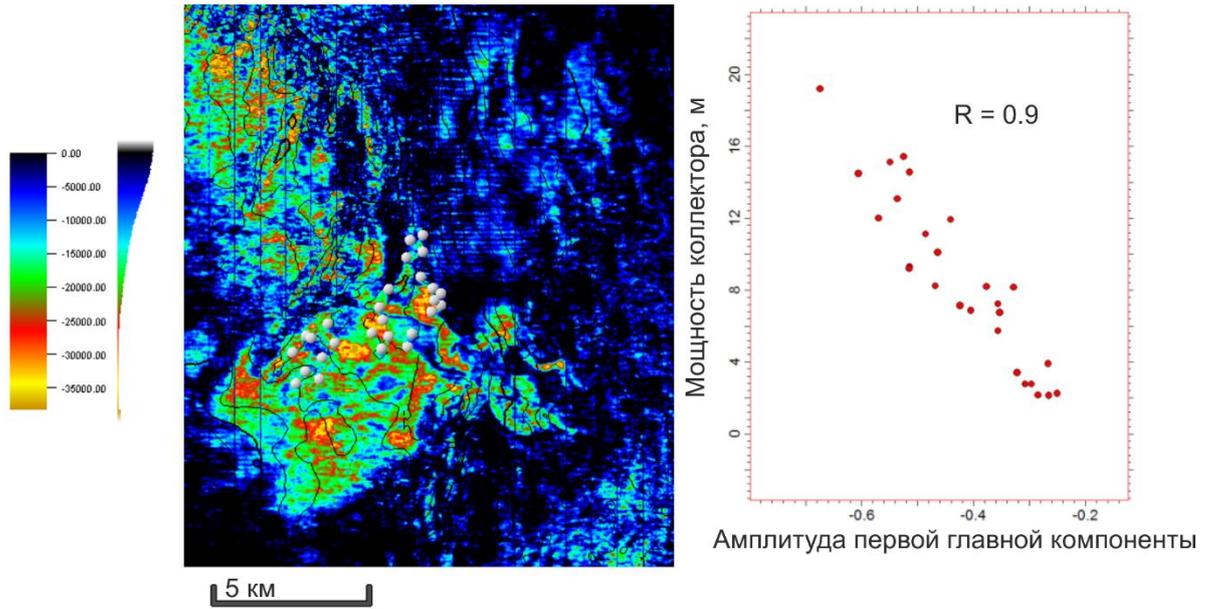


Рис. 59 Карта главной компоненты частотного псевдо-куба (слева), график зависимости амплитуды главной компоненты от эффективной мощности коллектора (справа).

Глава 5. Результаты анализа геологических объектов ачимовской толщи Ноябрьского региона

Анализ геологических объектов ачимовской толщи Ноябрьского региона заключается в картировании песчаных тел, которые характеризуются максимальной перспективностью с точки зрения наличия коллектора. В рамках данного анализа поставлены две основные задачи:

1) Детальный анализ изучаемого месторождения с использованием метода спектральной декомпозиции. Выполнен подбор современных аналогов, а также совместная интерпретация сейсмической и геологической информации с привлечением керна. Определены две области развития лавинной седиментации, для которых выполнен совместный анализ сейсмической и геологической информации. Апробация выполненных построений выполнена для центральной области месторождения, в пределах которой развивается площадной конус выноса.

2) Региональное картирование перспективных песчаных тел внутри ачимовской толщи в пределах Ноябрьского региона. На всех месторождениях выполнена интерпретация клиноформных циклов и определены дистальные участки клиноформ, отвечающие ачимовской толще. С привлечением результатов спектральной декомпозиции выполнено картирование аномальных областей, отвечающих песчаным геологическим телам. В качестве результата получен детальный план расположения потенциально продуктивных геологических объектов ачимовской толщи на изучаемых месторождениях Ноябрьского региона. Наличие подобной информации позволяет перейти к оценке ресурсного потенциала и планированию поисково-разведочного бурения.

5.1 Детальный анализ изучаемого месторождения

В пределах изучаемого месторождения существует две продуктивные области, характеризующиеся промышленными запасами нефти. Обе залежи приурочены к областям лавинной седиментации, выделенным ранее: одна соответствует развитой сети палеоканалов, вторая - конусам выноса.

Описанные в предыдущих разделах методы анализа спектральных данных легли в основу детального изучения перспективных областей продуктивного пласта.

5.1.1 Подбор современных аналогов

Согласно принципу актуализма Ч. Лайеля, силы, действующие в современных обстановках седиментации, тождественны с силами, действовавшими в геологическом прошлом. Исходя из этого, для более детального понимания условий седиментации геологических тел, наблюдаемых по спектральным аномалиям, целесообразно произвести подбор аналогов в современных геологических обстановках. Для решения поставленной задачи были использованы общедоступные источники спутниковых снимков.

Южная аномальная область месторождения отвечает путям транспортировки осадочного материала, поступающего с шельфовой части - каньоном, заполненным осадочным материалом. В современных обстановках аналогичное геоморфологическое строение имеет каньон Партингтон на западном побережье Северной Америки. В рамках указанного каньона происходит развитие большого количества различных по геометрии подводных каналов, по которым идет транспортировка осадка в глубоководную часть бассейна (рис. 60)

Таким образом, можно сделать предположение, что наблюдаемые на RGB-карте палеоканалы также могли являться каньонами, по которым осадочный материал поступал в глубоководную часть палеобассейна. В дальнейшем эти каньоны заполнялись осадочным материалом по мере изменения глубины бассейна. Общая тенденция развития клиноформенного комплекса отражает проградацию палеошельфа в западном направлении. Исходя из этого, можно сделать вывод, что основное заполнение каналов носит регрессионный характер, что отражается в преобладании осадков песчаной фракции. Этот факт в конечном итоге определяет высокую проницаемость пород, заполняющих палеоканьоны, что делает их перспективными коллекторами УВ.

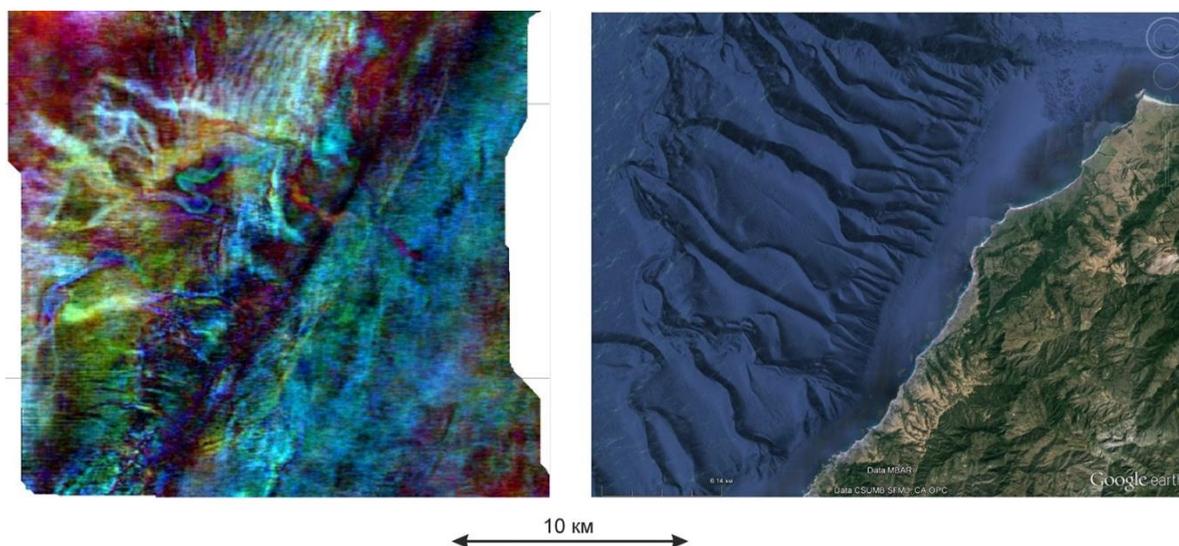


Рис. 60 Сравнение карты RGB по южной части изучаемого месторождения (слева) и батиметрической карты Тихоокеанского побережья Северной Америки (справа)

Центральная аномальная область месторождения также может иметь аналоги в современных обстановках осадконакопления. Наилучшим примером является каньон Пионер и сопряженная с ним возвышенность Гайд. В данном случае каньон является мощным каналом транспортировки осадочного материала, а его аккумуляция в глубоководной части бассейна приводит к возникновению возвышенности, поэтому она может рассматриваться как подводный конус выноса.

При этом аналог в современном рельефе отражает и область «ряби» в ортоформенной части пласта, которая изначально не расценивалась как геологическая структура. Подобная форма рельефа связана со склоновыми процессами и наблюдается в зоне отсутствия каньонов (рис. 61).

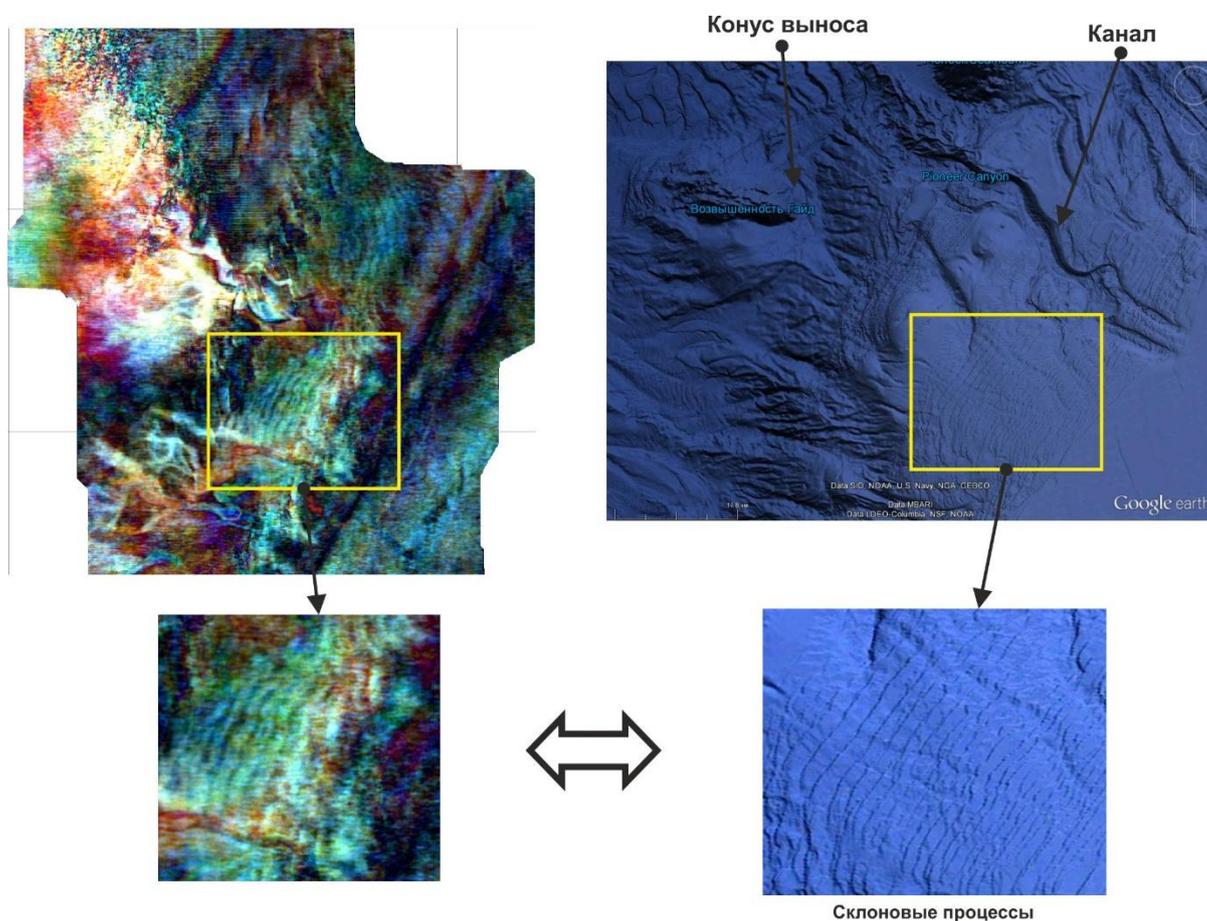


Рис. 61 Сравнение карты RGB по центральной части изучаемого месторождения (слева) и батиметрической карты Тихоокеанского побережья Северной Америки (справа)

Таким образом, в результате проведенного исследования было показано, что наблюдаемые в волновом поле аномалии полностью находят свои аналоги и в современных обстановках, что повышает достоверность интерпретации полученных данных.

Еще одним выводом может служить генетическая связь ачимовских коллекторов с шельфовой частью пласта. Ачимовские отложения, которые ранее

интерпретировались как невыдержанные песчаные линзы, являются относительно глубоководной частью единого комплекса осадочных пород и связаны с областями лавинной седиментации – глубоководными каньонами и конусами выноса.

5.1.2 Результаты изучения ачимовских залежей

5.1.2.1 Южная залежь

Южная залежь приурочена к области развития палеоканалов, прорывающих бровку шельфа и развивающихся в северо-западном направлении. В настоящий момент в рамках данной залежи пробурено несколько разведочных скважин, которые установили нефтенасыщенность ачимовских коллекторов в данном районе. Каменный материал доступен только по одной скважине, разрез которой позволяет установить наличие достаточно мощного интервала конгломератов, что указывает на развитие палеоканалов (рис. 62).

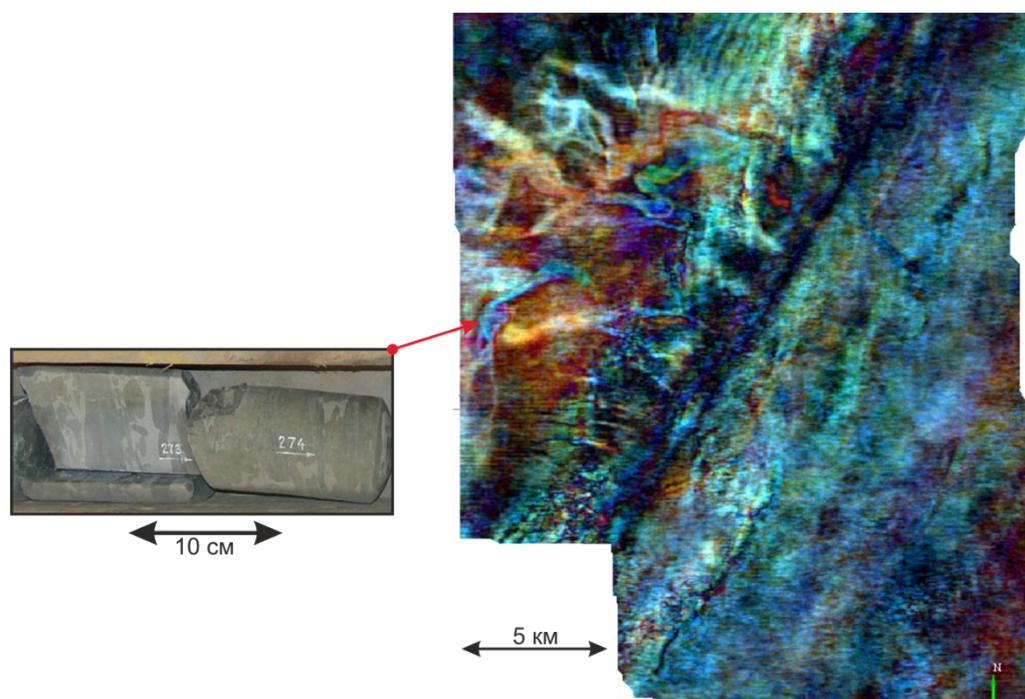


Рис. 62 RGB-карта ачимовского комплекса по южной части изучаемого месторождения (справа), керн по скважине 1 (справа).

Применение метода спектральной декомпозиции позволило в значительной мере повысить уровень знаний о внутреннем строении продуктивного ачимовского интервала. Использование стандартного подхода к анализу данных не давало возможности установить наличие большого количества каналов, которые могут выступать коллекторами УВ. При этом фактически пробуренные скважины позволяют установить прямую связь нефтяного притока с наличием палеоканала в разрезе скважины. Продуктивными являются даже относительно мелкие каналы в южной части залежи. Скважины, пробуренные вне спектральных аномалий, характеризуются отсутствием притока, вскрывая преимущественно глинистый разрез.

Таким образом, для южной залежи был получен инструмент, позволяющий прогнозировать вероятную продуктивность ачимовского разреза. Целевыми объектами для эксплуатационного бурения являются выделяемые по спектральным аномалиям палеоканалы.

Карты цветового комбинирования позволяют установить вероятное развитие наблюдаемых каналов в конус выноса, который развивается на западе вне изучаемой сейсмической площади. С целью подтверждения данного предположения был привлечен дополнительный объем сейсмических данных, который позволяет закартировать развитие палеоканьонов в площадной конус выноса в западной части месторождения. Выделяемая область является перспективной для бурения поисково-оценочных скважин и вероятного приращения запасов нефти.

5.1.2.2 Основная залежь

Основная залежь в ачимовских отложениях рассматриваемого месторождения приурочена к области развития конусов выноса в центральной части площади. Применение спектральной декомпозиции позволило значительно повысить информативность результатов интерпретации сейсмических данных.

Спектральная RGB-карта позволяет не только определить геометрию конусов выноса, но также установить наличие внутренних каналов, по которым происходило перераспределение осадка внутри. Данная информация является крайне важной при планировании разработки, так как позволяет сделать предположения о внутренней анизотропии свойств внутри геологического тела.

Совместный анализ RGB-карт и каменного материала

Совместное изучение спектральных карт и кернового материала (рис. 63) позволяет с одной стороны подтвердить корректность выполненной интерпретации, а с другой с большей достоверностью делать предположения о литологии участков, не освещенных бурением.

По результатам сопоставления каменного материала со спектральными аномалиями можно отметить высокую степень достоверности полученных RGB-карт. Скважина 8 на спектральной карте располагается в зоне развития подводящего канала, что однозначно подтверждается разрезом скважины – наблюдается мощная толща конгломератов. Скважина 7 по спектральной карте расположена вне аномальной области, то есть, приурочена к относительно глубоководным фациям, данное предположение полностью подтверждается каменным материалом – в разрезе скважины преобладают аргиллиты с прослоями карбонатов. Скважины 3 и 4 по спектральным картам расположены в основном теле конуса выноса, в разрезе наблюдаются массивные песчаники с прослоями конгломератов. Массивные песчаники без видимой текстуры указывают на быстрое осаждение материала, наличие конгломератов свидетельствует о временном действии каналов. Таким образом, фактический каменный материал подтверждает выдвинутое предположение о наличии в разрезе конусов выноса. Скважины 5 и 6 вскрывают более дистальные части конусов, поэтому в разрезе появляются тонкие переслаивания песчаников и аргиллитов. В скважине 6 также наблюдаются конгломераты, что указывает на действие каналов.

Таким образом, полученные в результате спектральной декомпозиции данные полностью согласуются с фактическим керновым материалом, что

позволяет с высокой степенью достоверности выполнять прогноз фациальных обстановок седиментации пород ачимовской толщи.

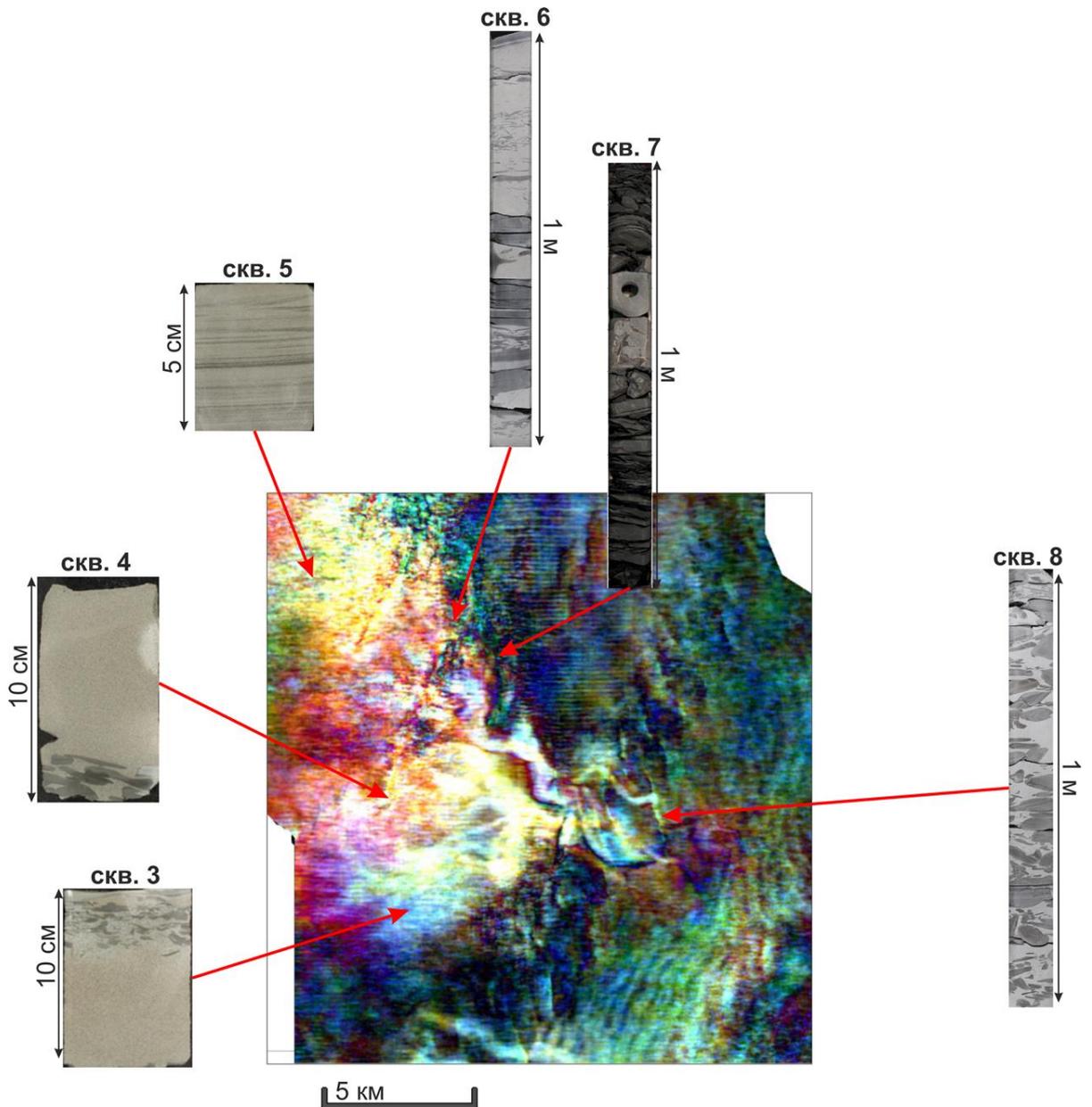


Рис. 63 Сопоставление результатов спектрального анализа (RGB-карта) ачимовского комплекса и керна по скважинам.

Детальность полученного пространственного представления о конусе выноса позволяет решать не только задачи геологического моделирования, но и контроля траектории горизонтальных стволов скважин. На рис. 64 показано геометрическое место точек, соответствующих конусу выноса с наложенными траекториями

горизонтальных стволов скважин. Как видно из иллюстрации, на некотором интервале горизонтального ствола наблюдался протяженный интервал отсутствия коллектора. Использование полученного из спектральных данных конуса выноса позволяет установить, что интервал отсутствия коллектора соответствует зоне выхода ствола из продуктивного тела. Наличие подобной информации до начала бурения позволит в дальнейшем избежать подобной ситуации, заранее спланировав наиболее оптимальную траекторию для бурения.

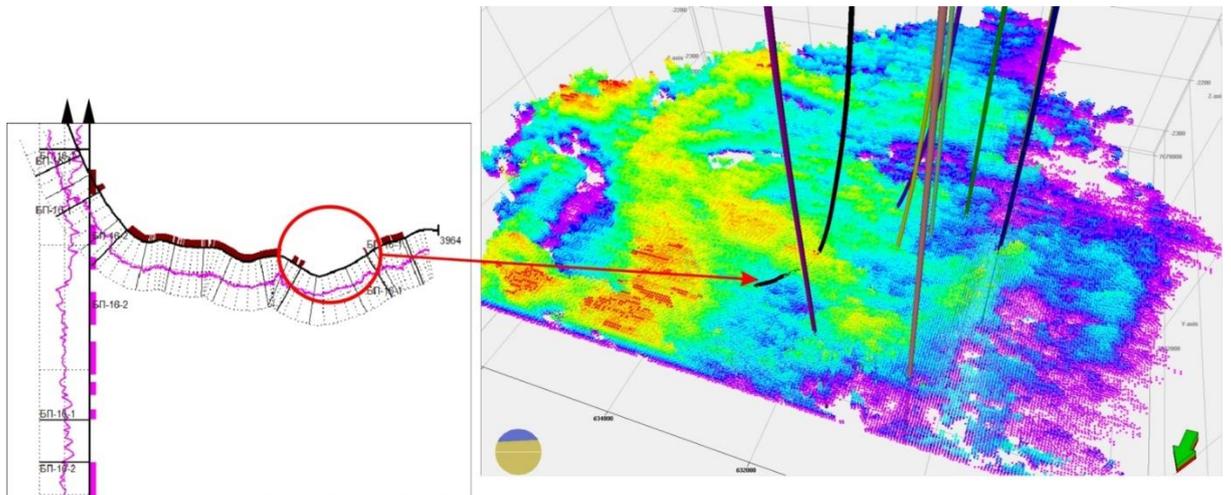


Рис. 64 Сопоставление разреза горизонтальной скважины (а) с результатом объемной интерпретации (б): выделенный конус выноса внутри ачимовского интервала с отображением траекторий скважин. Зоне отсутствия коллектора в разрезе скважин отвечает область выхода скважины из конуса выноса.

Кроме задач геометризации перспективного объекта, наличие спектральных данных позволяет также оценить возможное распределение эффективных толщин, что было показано в предыдущей главе. Наличие подобной информации является важным фактором при планировании эксплуатационного бурения.

5.1.2.3 Выводы

Ачимовские залежи на сегодняшний момент слабо вовлечены в промышленную разработку, поэтому их изучение является крайне актуальной

задачей в условиях падающих темпов добычи нефти. Наличие информации о внутреннем строении пласта, получаемой с использованием метода спектральной декомпозиции, позволяет в значительной степени снизить риски, связанные с неопределенностью его геологического строения.

В ходе выполненного исследования были выделены две перспективные области, характеризующиеся промышленными нефтяными притоками из ачимовского интервала. Южная область соответствует области развития сложной системы палеоканалов, размывающих бровку палеошельфа. Данные аномалии являются целевыми для заложения поисково-оценочного бурения в ходе дальнейшей разработки месторождения. Центральная область характеризуется наличием площадных конусов выноса осадочного материала, который поступал с шельфовой части пласта по подводным каналам, фиксируемым на спектральных RGB-картах. Наличие спектральных данных позволяет локализовать перспективные объекты, а также перейти к количественной оценке эффективной толщины коллектора.

Полученные результаты исследования являются основой дальнейшей разработки ачимовских залежей на изучаемом месторождении, так как позволяют выделить продуктивные объекты, что было невозможно без привлечения спектрального представления волнового поля.

На сегодняшний день выполненное исследование прошло апробацию бурением нескольких горизонтальных скважин. Все пробуренные скважины расположены в выделенном конусе выноса центральной залежи и характеризуются нефтяным притоком промышленного дебета.

5.1.3 Апробация результатов исследования

Полученная модель строения Ачимовского комплекса в районе основной залежи легла в основу планирования бурения горизонтальных добывающих скважин в тело выделенного конуса выноса.

В течение 2014-2016 гг. выполненные построения были успешно заверены 13 горизонтальными скважинами (таблица 8).

Таблица 8

Результаты бурения горизонтальных скважин

Скважина	Входной дебет нефти, т/сут	Обводненность, %
ГС1	55	52
ГС2	48	75
ГС3	42	71
ГС4	17	80
ГС5	7	90
ГС6	75	72
ГС7	65	70
ГС8	54	70
ГС9	86	75
ГС10	49	78
ГС11	67	73
ГС12	76	83
ГС13	62	77

Скважины 4 и 5 пробурены в краевой части конуса выноса, вскрывая водонефтяную зону, что объясняет высокое значение обводненности скважин. Характер темпов падения добычи на скважинах указывает на наличие каналов – скважины достаточно быстро обводняются со значительным падением дебетов нефти.

По итогам бурения с учетом результатов, описанных в настоящей диссертации, произведено стратегическое планирование дальнейшей разработки продуктивного объекта, направленное на постепенное смещение от разбуренной части в области, не затронутые бурением (рис. 65). Намечено бурение еще трех кустовых площадок (22 скважины) в основной части конуса в течение 2016 - 2017 гг.

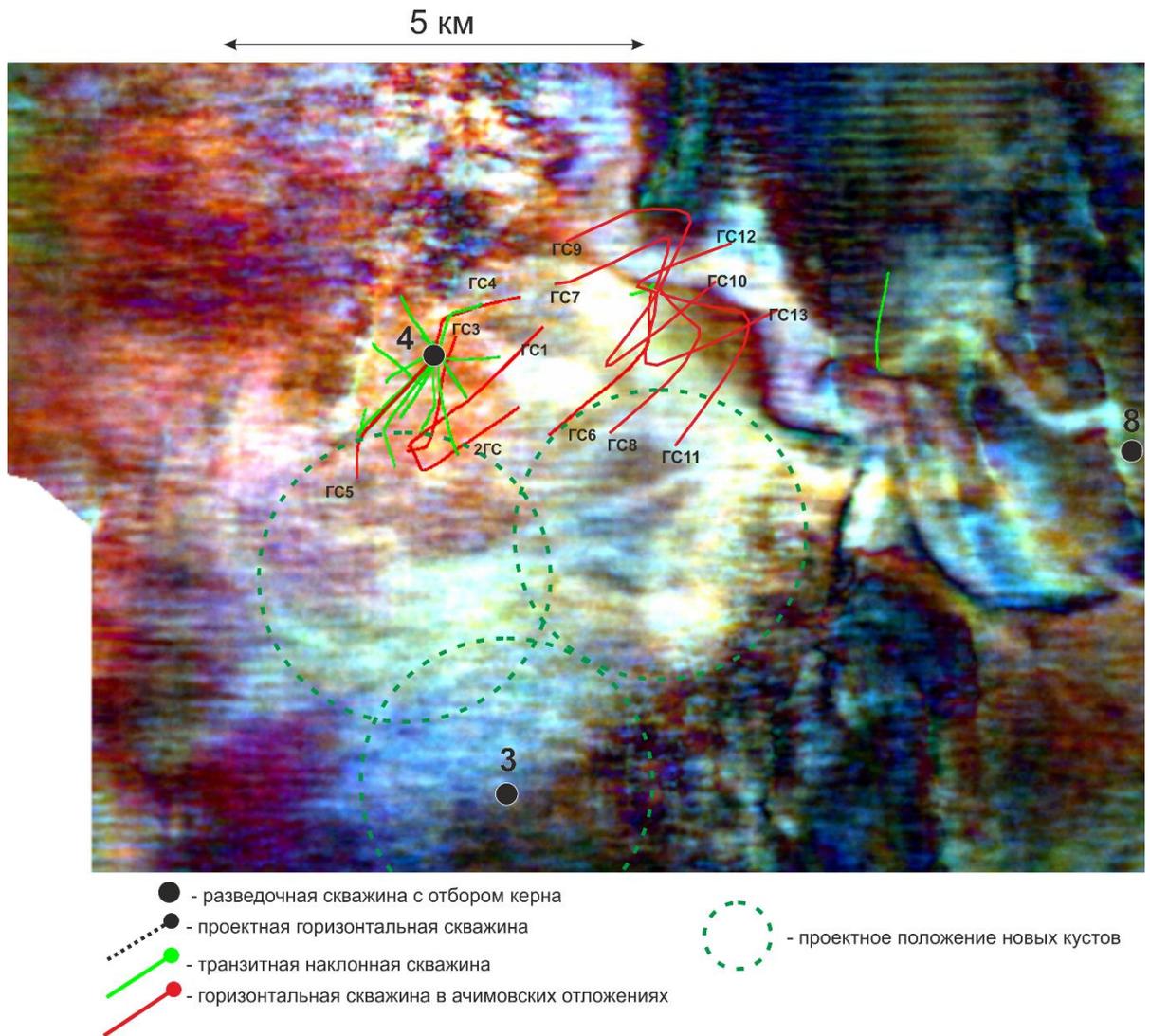


Рис. 65 Схема расположения пробуренных скважин в 2014-2016 гг. на RGB-карте центрального конуса выноса.

5.2 Региональное картирование перспективных песчаных тел внутри ачимовской толщи в пределах Ноябрьского региона

В рамках регионального изучения перспективности ачимовской толщи Ноябрьского региона поставлена задача картирования геологических объектов дистальной части клиноформных циклитов, которые приводят к формированию спектральных аномалий в волновом поле. Как было показано в предыдущих главах

диссертации, подобные объекты характеризуются преимущественно песчаным составом и в случае нефтяного насыщения могут служить объектами разработки. Таким образом, наличие спектральной аномалии волнового поля в данном случае выступает в качестве поискового критерия и позволяет, с высокой степенью вероятности, отражать наличие коллектора. Площадь исследования охватывает территорию более 180 000 кв.км и включает в себя более 20 действующих месторождений ПАО «Газпром нефть».

Для формирования региональной базы данных были использованы все имеющиеся сейсмические и скважинные данные – более 20 000 кв.км данных МОГТ 3D, более 1500 профилей МОГТ 2D (как региональной сети профилей, так и детальных съемок), более 1000 поисково-оценочных и разведочных скважин (рис. 66). Весь объем сейсмических данных был собран в единой информационной системе и увязан по реперному отражающему горизонту Б, отвечающему кровле баженовской свиты.

На следующем этапе были выделены и проинтерпретированы региональные границы клиноформенных циклитов, характерные для изучаемого региона, что позволило определить синхронные образования ачимовской толщи для разных месторождений. Границы комплексов образуют систему проградирующих клиноформных тел, развивающихся с востока на запад. Внутри каждого регионального циклита возможно выделение циклов более мелкого масштаба, с каждым из которых может быть связано развитие собственных песчаных тел в пределах дистальной (ачимовской) части. Поэтому для формирования детального представления о внутреннем строении и перспективах ачимовской толщи была выполнена детальная корреляция внутренних границ циклитов в пределах имеющихся съемок МОГТ 3D.

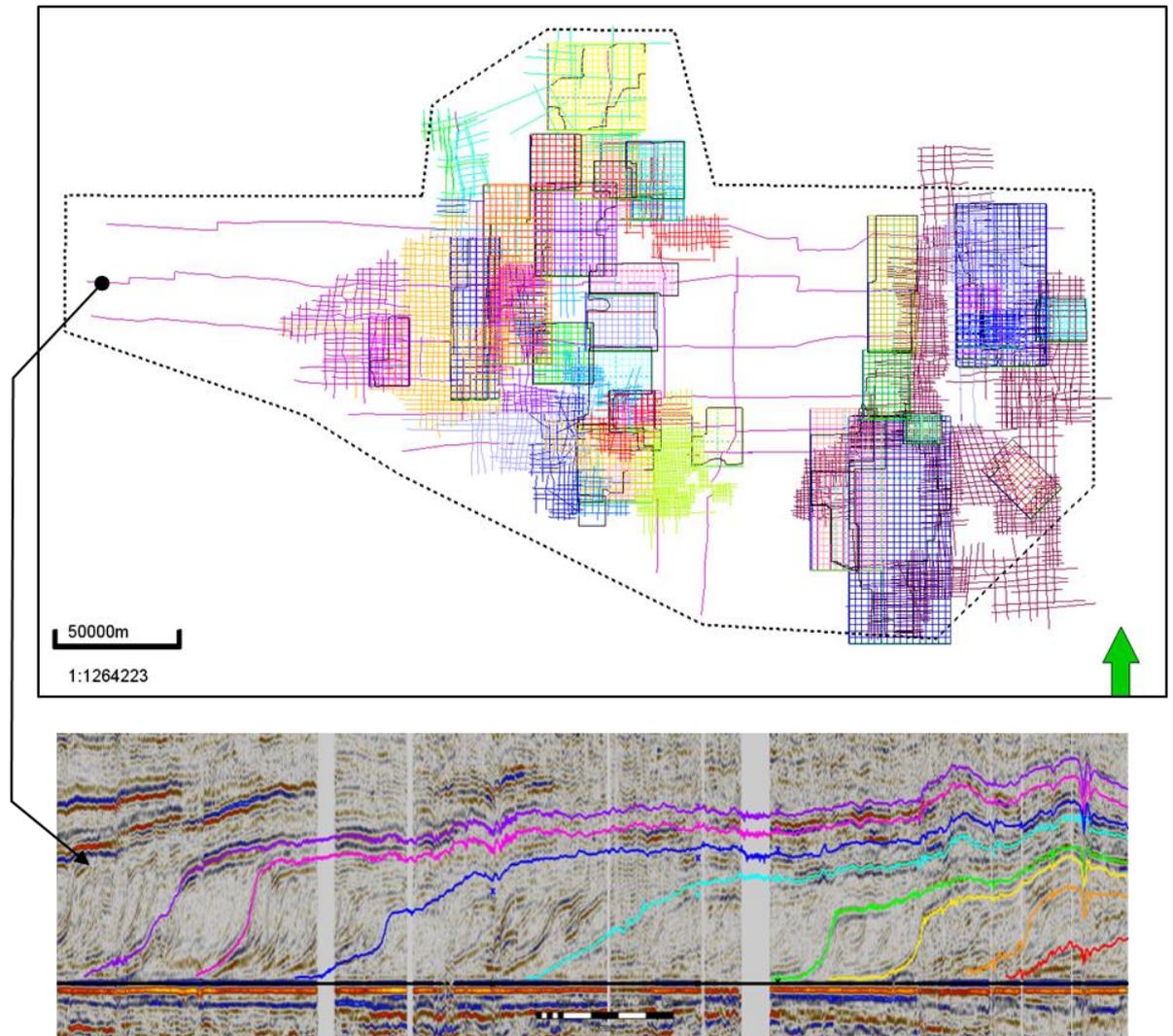


Рис. 66 Схема изученности территории данными МОГТ (сверху) и пример фрагмента регионального разреза в направлении запад-восток (снизу)

Детальная интерпретация клиноформного комплекса позволяет выполнить для каждой сейсмической границы построение RGB-карты по результатам спектрального разложения соответствующего сейсмического объема МОГТ 3D. Построение карт выполнялось для внутренних границ региональных циклитов, что позволило получить детальное представление о развитии локальных геологических тел по площади (рис. 67).

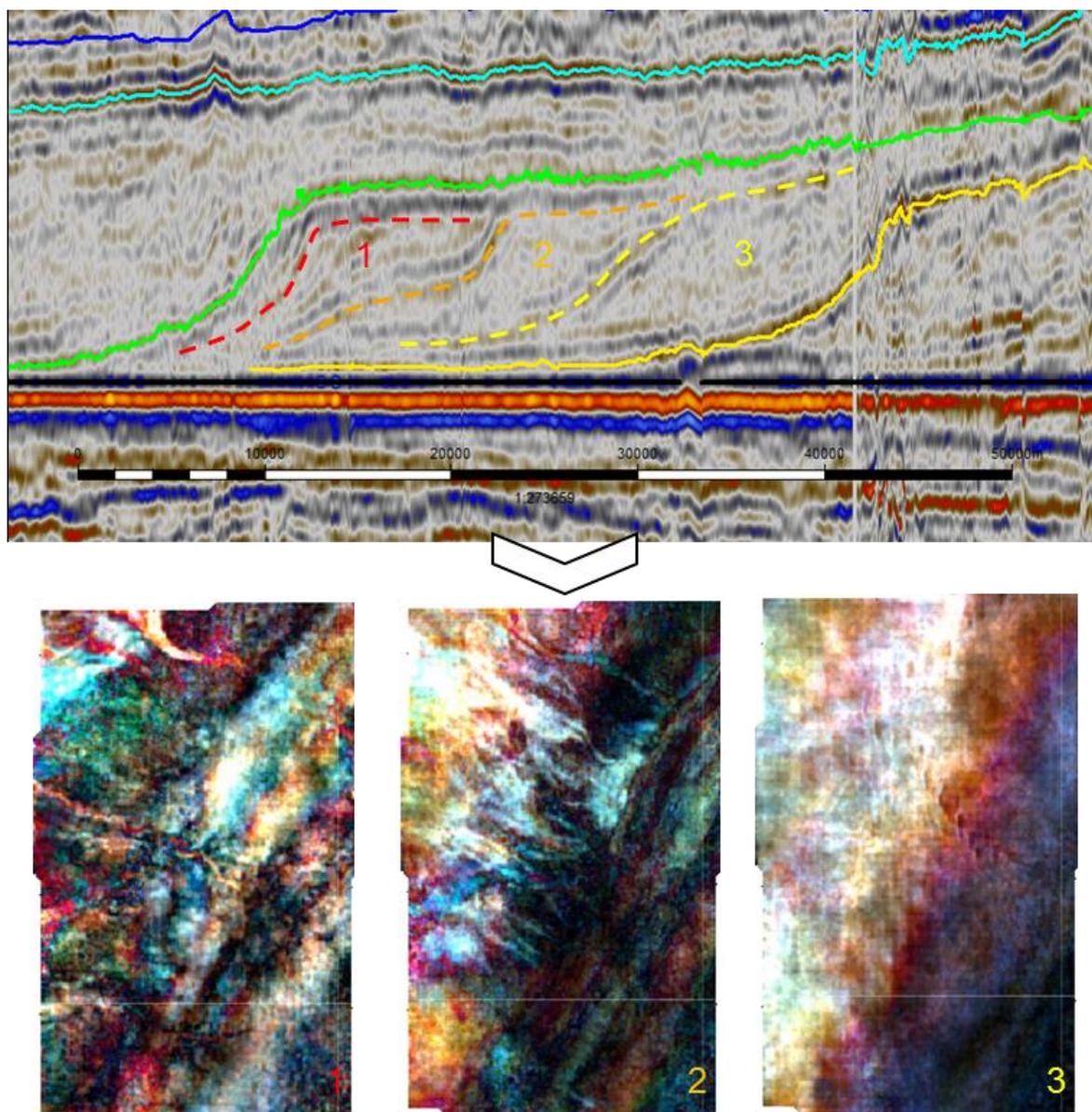


Рис. 67 Пример детальной интерпретации внутренних границ регионального циклита: пример разреза (сверху), сплошными линиями показаны региональные границы циклов, пунктиром – внутренние границы; пример RGB-карт для внутренних границ циклита (снизу).

Дальнейшее изучение полученных RGB-карт выполнялось с привлечением стандартных кинематических и динамических атрибутов волнового поля. На основании совокупной изменчивости характеристик сейсмических данных выделены основные геологические тела, характерные для ачимовской толщи (каньоны, конуса выноса, оползневые тела). На рис. 68 приведен пример подобного исследования для одного из месторождений Ноябрьского региона. В качестве

основного инструмента использована RGB-карта по кровле ачимовской толщи, а также карта временных толщин пласта (изопахит). На основании интерпретации указанных данных возможно выделение границы шельфовой террасы по максимальному градиенту толщин, а также геологических объектов, связанных с развитием зоны лавинной седиментации (каналы (каньоны) транспортировки, конусы выноса и оползневые склоновые процессы).

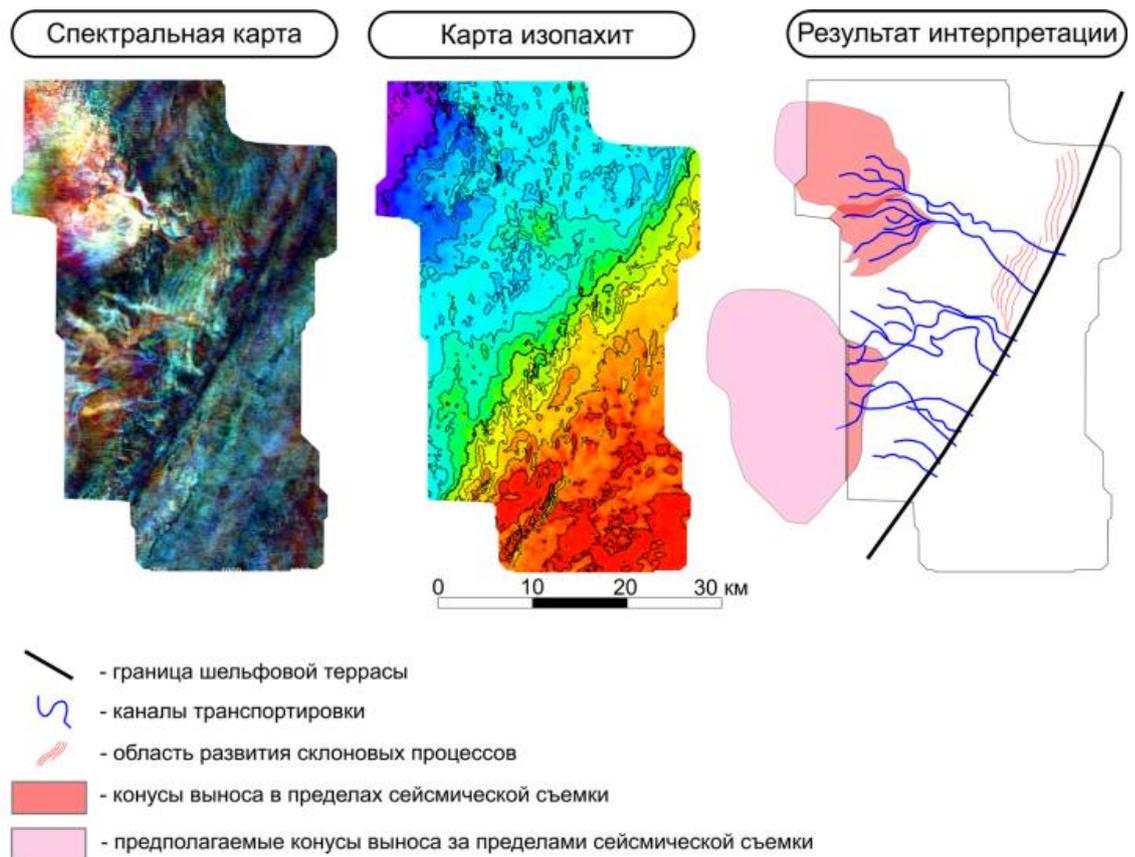


Рис. 68 Пример построения детального плана перспективных объектов. Слева – RGB-карта, в центре – карта изопахит, справа – результата интерпретации

Выполнение подобной интерпретации для всех изучаемых участков, освещенных данными МОГТ 3D, позволило получить детальный план развития геологических тел ачимовской толщи, приуроченных к дистальным частям разновременных клиноциклов (рис. 69).

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что развитие зон лавинной седиментации, выраженных каньонами (каналами транспортировки) и

конусами выноса является характерным процессом для относительно глубоководных частей западносибирского палеобассейна. К указанным областям приурочено накопление основного объема коллектора ачимовской толщи, что подтверждается совместным анализом результатов интерпретации сейсмических данных и керна.

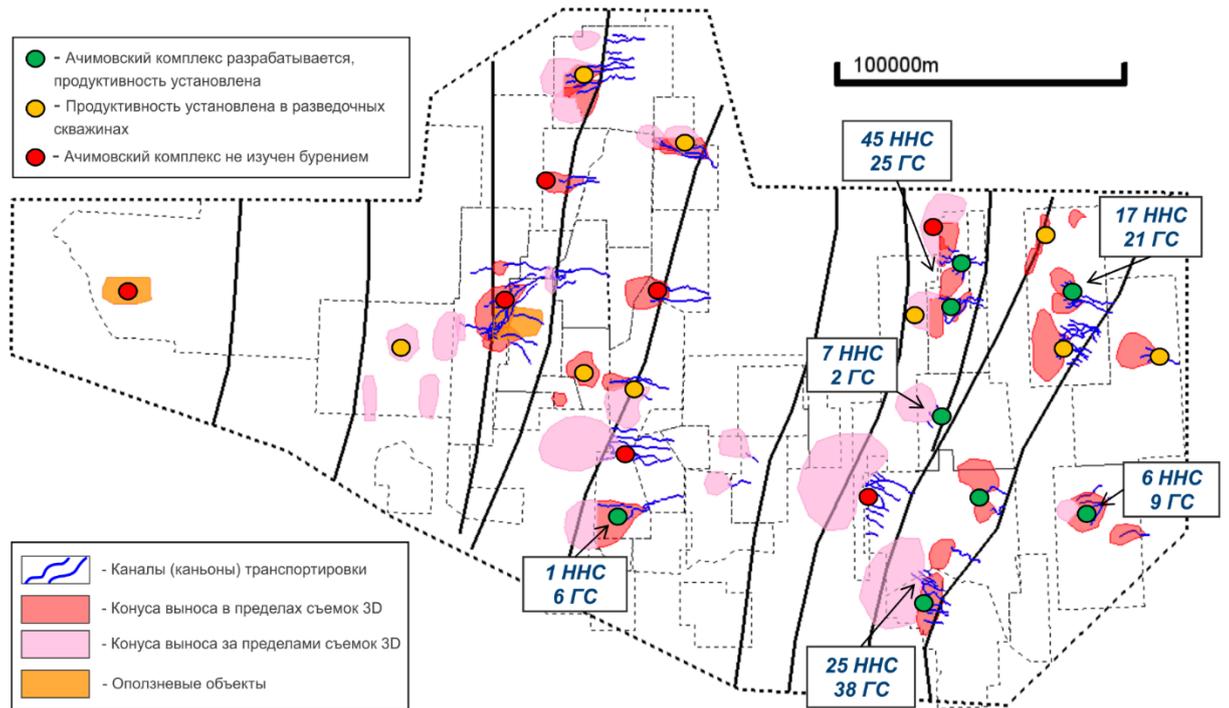


Рис. 69 Детальный план распространения перспективных песчаных тел ачимовской толщи в пределах Ноябрьского региона. Кружками показана степень изученности месторождения данными бурения. В прямоугольных рамках дана информация о фонде скважин – ННС – наклонно-направленные скважины, ГС – скважины с горизонтальным окончанием.

Анализ изученности ачимовской толщи Ноябрьского региона данными бурения показывает, что все участки, где ведется разработка этого типа отложений, приурочены к развитию локальных геологических объектов (конусов выноса и каналов транспортировки). На сегодняшний момент наблюдается неравномерная изученность ачимовской толщи Ноябрьского региона. Восточная часть характеризуется удовлетворительной разбуренностью, добыча нефти ведется на

пяти месторождениях в зонах развития конусов выноса и каналов транспортировки. Для западной части наблюдается крайне низкая степень изученности – в большинстве случаев ачимовская толща остается не вскрытой скважинами. Таким образом, наличие детального плана перспективных объектов позволяет установить высокий потенциал открытия новых залежей в западной части Ноябрьского региона. Полученные результаты интерпретации позволяют выделить наиболее перспективные зоны, а также перейти к оценке ресурсного потенциала для дальнейшего планирования поисково-разведочного бурения.

Заключение

В рамках исследования подробным образом описано геологическое строение продуктивных ачимовских пластов рассматриваемого месторождения при помощи ядерного материала и палеогеографического анализа по сейсмическим данным доказана их фациальная приуроченность к относительно глубоководным условиям подножия шельфовой террасы. Исходя из геометрических размеров продуктивных тел, характерных для областей лавинной седиментации, описаны основные негативные факторы, влияющие на результаты анализа волнового поля в рамках стандартных алгоритмов. Вынесенные предположения в дальнейшем были подтверждены практическими результатами на примере рассматриваемого месторождения, что позволило выдвинуть тезис о малой информативности стандартных подходов при изучении ачимовского типа разреза. В этой связи предложено использовать спектральный подход к анализу волнового поля.

В диссертации изложены основные теоретические основы и предпосылки использования спектральной декомпозиции волнового поля. Доказано преимущество использования алгоритма НВП по сравнению с преобразованием Фурье (в том числе оконного преобразования Фурье). Эмпирически показано более предпочтительное использование сигнала Риккера в рамках алгоритма НВП для решения геологических задач по изучению ачимовских пластов.

Выполнено математическое моделирование волнового поля, по результатам которого доказана применимость метода спектральной декомпозиции для решения поставленной задачи детального геологического изучения продуктивного пласта.

Подробно рассмотрен процесс интерпретации результатов непрерывного вейвлет-преобразования как с точки зрения качественной интерпретации, так и с позиций количественного прогноза. В ходе выполнения исследования разработаны новые подходы к анализу спектральных данных:

1) Разработана методика расчета цифровых RGB-массивов. Для их визуализации в геологических пакетах, создана база данных псевдотрехмерных палеток для предложенной методики.

2) Разработан алгоритм получения спектральной кривой, что позволяет использовать методики многомерной статистики для анализа спектральных характеристик.

Основные геологические результаты заключаются в выделении и локализации наиболее перспективных областей ачимовского пласта для дальнейшей разработки нефтяных залежей, а также прогнозе эффективных толщин коллектора. При этом детальность используемого метода позволяет подробно восстановить внутреннюю структуру пласта, что невозможно с использованием стандартных подходов к анализу. Сделанные выводы о внутреннем строении и перспективности рассматриваемых ачимовских пластов были подтверждены в процессе бурения 13 горизонтальных скважин (2014-2016 гг.).

Положительный результат бурения позволяет произвести дальнейшее планирование стратегии разработки с учетом новых полученных данных, основанных на интерпретации результатов спектральной декомпозиции. Полученные положительные результаты были экстраполированы на другие месторождения ПАО «Газпром нефть» в Ноябрьском регионе. Результатом данного исследования стал детальный план перспективных объектов ачимовской толщи, позволяющий оценить ресурсный потенциал территории, а также запланировать дальнейшее поисково-разведочное бурение с высоким потенциалом открытия новых залежей.

Таким образом, в ходе выполнения диссертационного исследования все поставленные задачи были успешно решены.

Полученные результаты исследования метода спектральной декомпозиции характеризуются научной новизной и являются актуальными с позиций их применимости в области изучения динамических характеристик волнового поля.

Защищаемые положения диссертации:

1. Подтверждена связь продуктивных участков ачимовской толщи с развитием локальных турбидитовых систем в относительно глубоководных условиях эпиконтинентального бассейна, на основе комплексного изучения геолого-геофизической информации с привлечением спектрального анализа сейсмических данных.

2. Для детального изучения геометрии и внутреннего строения песчаных тел ачимовской толщи является эффективным использование непрерывного вейвлет-преобразования по сигналам Рикера в сочетании с методикой интерпретации "цифрового RGB".

3. При прогнозировании ёмкостных свойств песчаных тел ачимовской толщи обосновано использование локального спектра волнового поля (атрибута "спектральная кривая") как наиболее информативной характеристики сейсмических данных.

Результаты характеризуются практической и научной значимостью и могут быть рекомендованы для использования при изучении других месторождений со схожим геологическим строением целевых пластов.

Направление частотно-временного анализа волнового поля является перспективным в современной геофизике, его дальнейшее развитие может происходить в двух основных областях:

1) Совершенствование методов спектральной декомпозиции. На сегодняшний день оконное преобразование Фурье и непрерывное вейвлет-преобразование являются наиболее распространенными алгоритмами, однако характеризуются недостатками, определяющимися принципом неопределенности Гейзенберга, а именно невозможности одновременной локализации по времени и по частоте. В настоящее время указанная проблема может быть решена в рамках технологий спектральной инверсии, которые являются более вычислительно сложными, однако при этом позволяют получить высокое разрешение одновременно во временной и в частотной областях;

2) Совершенствование методов прогноза геологических свойств целевых пластов. Данная область является общей для методов интерпретации материалов сейсморазведки и связано в первую очередь с современными геологическими задачами, ориентированными на прогноз фациального строения и фильтрационно-емкостных свойств сложных литологических залежей.

Диссертационная работа представляет собой законченное научное исследование с практически значимыми результатами, применение которых на сегодняшний день активно ведется в рамках деятельности Компании ПАО «Газпром нефть».

По теме диссертации опубликованы следующие научные работы:

1. Буторин А.В. Строение продуктивного клиноформного пласта по данным сейсморазведки // Геофизика. 2015. №1. с 10-18
2. Буторин А.В., Зиннурова Р.Р., Митяев М.Ю., Онегов А.В., Шарифуллин И.Ф., Виноходов М.А. Оценка потенциала тюменской свиты в пределах Ноябрьского региона Западной Сибири // Нефтяное хозяйство. 2015. №12. с. 41-43
3. Буторин А.В., Зиннурова Р.Р., Митяев М.Ю., Онегов А.В., Шарифуллин И.Ф., Виноходов М.А. Использование современных алгоритмов анализа сейсмических данных для определения потенциала ачимовских отложений Ноябрьского региона // Нефтяное хозяйство. 2015. №12. С. 52-54
4. Буторин А.В. Изучение геологических объектов ачимовской свиты при помощи спектральной декомпозиции волнового поля // Геофизика. 2016. №2. с. 10-18
5. Butorin A.V. Application of wavelet spectral decomposition for geological interpretation of seismic data // Journal of Geological Resource and Engineering. 2016. vol. 4, No.5, p. 231-241

6. Буторин А.В., Васильев М.А. Опыт учета влияния газовой шапки на структурные построения в условиях ограниченности входных данных // Геофизика. 2016. №4. с. 42-47

7. Буторин А.В. Изучение спектральных характеристик волнового поля на примере модельных данных по результатам вейвлет-преобразования // Геофизика. 2016. №4. с. 61-67

8. Буторин А.В., Краснов Ф.В. Сравнительный анализ методов спектральной инверсии волнового поля на примере модельных трасс // Геофизика. 2016. №4. с. 68-76

9. Буторин А.В. Применение анализа волнового поля для изучения клиноформных комплексов // Azerbaijan Geologist. №20. 2016. с. 12-21

Диссертационная работа выполнена в объеме 141 страниц, состоит из пяти глав, введения и заключения.

Список литературы

1. **Буторин А.В.** Строение продуктивного клиноформного пласта по данным сейсморазведки / А.В. Буторин // Геофизика. – 2015. – №1. – С. 10-18
2. **Буторин А.В.** Оценка потенциала тюменской свиты в пределах Ноябрьского региона Западной Сибири / Р.Р. Зиннурова, М.Ю. Митяев, А.В. Онегов, И.Ф. Шарифуллин, М.А. Виноходов // Нефтяное хозяйство. – 2015. – №12. – С. 41-43
3. **Буторин А.В.** Использование современных алгоритмов анализа сейсмических данных для определения потенциала ачимовских отложений Ноябрьского региона / Р.Р. Зиннурова, М.Ю. Митяев, А.В. Онегов, И.Ф. Шарифуллин, М.А. Виноходов // Нефтяное хозяйство. – 2015. – №12. – С. 52-54
4. **Буторин А.В.** Изучение геологических объектов ачимовской свиты при помощи спектральной декомпозиции волнового поля / А.В. Буторин // Геофизика. – 2016. – №2. – С. 10-18
5. **Буторин А.В.** Опыт учета влияния газовой шапки на структурные построения в условиях ограниченности входных данных / А.В. Буторин, М.А. Васильев // Геофизика. – 2016. – №4. – С. 42-47
6. **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
7. **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
8. **Буторин А.В.** Применение анализа волнового поля для изучения клиноформных комплексов / А.В. Буторин // Azerbaijan Geologist. – 2016. – №20. – С. 12-21

9. **Гурари Ф.Г.** Строение и условия образования клиноформ неокомских отложений Западно-Сибирской плиты / Ф.Г. Гурари. – Новосибирск. – СНИИГГиМС. – 2003. – 141 с.
10. **Гурвич И.И.** Об отражениях от тонких пластов в сейсморазведке / И.И. Гурвич // Прикладная геофизика. – 1952. – вып. 9. – С. 38-53
11. **Наумов А.Л.** О литологических залежах углеводородов на севере Западной Сибири / А.Л. Наумов, Т.М. Онищук, Н.П. Дядюк // Геология нефти и газа. – 1979. – №8. – С. 15-20
12. **Нежданов А.А.** Геология и нефтегазоносность ачимовской толщи Западной Сибири / А.А. Нежданов, В.А. Понаморов, Н.А. Туренков, С.А. Горбунов. – М. – изд. Академии горных наук. – 2000. – 274 с.
13. **Орлов А.И.** Прикладная статистика / А.И. Орлов. – М. – Экзамен. – 2004. – 110 с.
14. **Ростовцева Н.Н.** Стратиграфический словарь мезозойских и кайнозойских отложений Западно-Сибирской низменности / Н.Н. Ростовцева. – М. – Недра. – 1968. – 215 с
15. **Яковлев А.Н.** Введение в вейвлет-преобразования / А.Н. Яковлев. – Новосибирск. – изд. НГТУ. – 2003. – 104 с.
16. **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
17. **Butorin A.V.** Approaches to the Analysis of Spectral Decomposition for the Purpose of Detailed Geological Interpretation [Электронный ресурс] / A.V. Butorin, F.V. Krasnov // SPE. – 2016. – № 182079-MS. – Режим доступа: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-182079-MS>
18. **Butorin A.V.** Features of Tyumen Formation facial structures according to the spectral decomposition [Электронный ресурс] / A.V. Butorin, R.R. Zinnurova // SPE. – 2015. – № 176613-MS. – Режим доступа: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-176613-MS>

19. **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. – Режим доступа: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SEG-2015-5916038>
20. **Castagna J.P.** Instantaneous spectral analysis: Detection of low frequency shadows associated with hydrocarbons / J.P. Castagna, S. Sun, R. W. Siegfried // The Leading Edge. – 2003. – vol. 22. – p. 120–127
21. **Castagna J.P.** Comparison of spectral decomposition methods / J.P. Castagna // First Break. – 2006. – vol. 24. – p. 75-79
22. **Chakraborty A.D.** Okaya, Frequency-time decomposition of seismic data using wavelet based methods / A.D. Chakraborty // Geophysics. – 1995. – vol. 60. – p. 1906-1916
23. **Cohen L.** Time frequency analysis / L. Cohen. – USA. – Prentice Hall PTR. – 1995. – 184 p.
24. **Daubechies I.** Ten lectures on wavelets / I. Daubechies. – Society for Industrial and Applied Mathematics. – 1992. – 357 p.
25. **Gabor D.** Theory of communication / D. Gabor // Journal of the Institute of Electrical Engineers. – 1946. – p. 429–457
26. **Girolodi L.** Using spectral decomposition to identify and characterize glacial valleys and fluvial channels within the Carboniferous section in Bolivia / L. Girolodi, F. Alegria // The Leading Edge. – 2005. – vol. 24.– p. 1152–1159
27. **Hall M.** Resolution and uncertainty in spectral decomposition / M. Hall // First break. – vol. 24. – 2006. – p. 43-47
28. **Henderson J.** Automated delineation of geological elements from 3D seismic data through analysis of multichannel, volumetric spectral decomposition data / J. Henderson, Stephen J Purves, Chris Leppard. // First break. – vol. 25. – 2007. – p. 87-93
29. **Kohonen T.** Self-Organizing Maps / Kohonen T. – Third Extended Edition. – New York. – 2001. – 501 p.

30. **Li Y.** Spectral decomposition using Wigner-Ville distribution with applications to carbonate reservoir characterization / Y. Li, X. Zheng. // *The Leading Edge*. – 2008. – vol. 27. – p. 1050–1057
31. **Li Y.** High-frequency anomalies in carbonate reservoir characterization using spectral decomposition / Y. Li, X. Zheng, Y. Zhang. // *Geophysics*. – 2011. – vol. 76. – p. 47–57.
32. **Liu J.** Instantaneous spectral attributes to detect channels / J. Liu, K. Marfurt. // *Geophysics*. – 2007. – vol. 72. – p. 23–31.
33. **Liu J.** Multi-color display of spectral attributes [Электронный ресурс] / J. Liu, Kurt J. Marfurt. // *SEG. New Orleans Annual Meeting*. – 2006. – Режим доступа: <https://library.seg.org/doi/abs/10.1190/1.2369707>
34. **Mallat S.** A wavelet tour of signal processing / S. Mallat. – Academic Press. – 2008. – 668 p.
35. **Mallat S.** Matching pursuit with time-frequency dictionaries / S. Mallat, Z. Zhang. // *IEEE Transactions in Signal Processing*. – 1992. – vol. 41. – p. 3397-3415.
36. **Marfurt K.** Narrow-band spectral analysis and thin-bed tuning / K. Marfurt, R. Kirlin. // *Geophysics*. – 2001. – vol. 66. – 1274–1283.
37. **Marfurt K.** Seismic attributes and the road ahead / K. Marfurt // *Geophysical Society of Houston*. – 2015. – p. 11-15
38. **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
39. **McArdle N.J.** The use of geologic expression workflows for basin scale reconnaissance: A case study from the Exmouth Subbasin, north Carnarvon Basin, northwestern Australia / N.J. McArdle, D. Iacopini, M. A. KunleDare, G. S. Paton. // *Interpretation*. – 2014. – vol. 2. – №1. – p.163–177
40. **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

41. **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
42. **Partyka G.** Interpretational applications of spectral decomposition in reservoir characterization / G. Partyka, J. Gridley, J. Lopez. // *The Leading Edge*. – 1999. – vol. 18. – p. 353–360
43. **Reine C.** The robustness of seismic attenuation measurements using fixed- and variable-window time-frequency transforms / C. Reine, M. van der Baan, R. Clark. // *Geophysics*, – 2009. – vol. 74. – p. 123–135.
44. **Sinha S.** Spectral decomposition of seismic data with continuous wavelet transform / S. Sinha, P. S. Routh, P. D. Anno, J. P. Castagna // *Geophysics*, – 2005. – vol. 70. – №6. – p. 19-25.
45. **Tracy J.** Visualization of Spectral Decomposition Implied Bed Thickness as a Function of Relative Geologic Time by Utilizing Age and Seismic-Wheeler Volumes [Электронный ресурс] / J. Tracy // *SEG New Orleans Annual Meeting*. – 2006. – Режим доступа: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SEG-2006-0993>
46. **Stockwell R.** Localization of the complex spectrum: the S-transform. / R. Stockwell, L. Mansinha, R. Lowe. // *IEEE Transactions on Signal Processing*. – 1996. – vol. 44. – 1996. – p. 998–1001
47. **Tri W.** Thickness estimation using gradient of spectral amplitude from spectral decomposition [Электронный ресурс] / W. Tri, L. Novitasari, S. Winardhi // *SEG San Antonio Annual Meeting*. – 2011. – Режим доступа: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SEG-2011-1923>