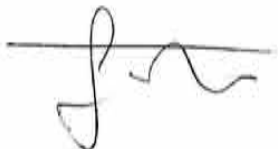


На правах рукописи

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*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук**

Санкт-Петербург – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении «Всероссийский научно-исследовательский институт им. А.П. Карпинского»

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

Официальные оппоненты:
Нежданов Алексей Алексеевич
доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, ООО «Газпром геологоразведка», заместитель начальника инженерно-технического центра (ИТЦ) по научной работе

Колесов Валентин Валентинович
кандидат физико-математических наук, доцент, АО «Пангея», генеральный директор

Ведущая организация - Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук

Защита диссертации состоится 20 июня 2018 г. в 14 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.224.01 при Санкт-Петербургском горном университете по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., дом 2, ауд. 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета и на сайте www.spmi.ru

Автореферат разослан 20 апреля 2018 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КИРЬЯКОВА
Ирина Геннадьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. 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.

Актуальность исследования связана с увеличением доли сложных литологических ловушек 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 большое количество залежей нефти, газа и конденсата, многие, из которых относятся к крупным. 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 внутренней структуры 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. 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 аналогичного строения.

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 исследуемого направления. Одной из первых отечественных работ, посвященных использованию спектрального анализа волнового поля, является статья И.И. Гурвича. 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. Технология основывается на применении преобразования Фурье в локальном скользящем окне; при этом важным вопросом является выбор оконной функции. Развитие метода привело к возникновению S-преобразования, 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.

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, которые послужили началом интенсивного исследования вейвлетов в последующие годы. Развитие метода вейвлет-анализа привело к появлению технологии непрерывного вейвлет-преобразования (НВП). Его использование в рамках изучения сейсмических сигналов описано в работе. Дальнейшее развитие метода привело к появлению метода спектральной инверсии, описанной в работе Молла, которая заключается в разложении сигнала по заданной библиотеке вейвлетов. Как показано в работе Кастаньи, 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, анализа маломощных геологических объектов, картирования

особенностей пласта, таких как палеоканалы и рифовые постройки, для оценки затухания сейсмического сигнала, а также для возможного прогнозирования углеводородов по низкочастотным теневым областям и высокочастотным откликам. Значительное развитие спектрального анализа связано с появлением специализированного мульти-цветового алгоритма визуализации – RGB-смешивание.

В настоящее время технология спектральной декомпозиции является широко используемой для изучения сложных литологических залежей.

Цель работы. 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.

Задачи:

1. сравнительный анализ методик спектральной декомпозиции на примере целевого ачимовского пласта;
2. определение основных характеристик геологического разреза, влияющих на характер спектральных аномалий волнового поля, на примере математической модели ачимовского пласта;
3. выбор наиболее информативных способов анализа спектрального состава сейсмических записей и их сравнение со стандартными методами динамической интерпретации;
4. определение строения целевого ачимовского интервала на основе комплексирования геологической информации по скважинам и результатов изучения спектрального состава волнового поля;
5. 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.

Фактический материал, методы исследования, личный вклад автора. В основу работы положены систематизированные и проинтерпретированные автором геолого-геофизические данные по Ноябрьскому региону, а также результаты анализа и обобщения

геологической документации, фондовых и опубликованных данных по рассматриваемому району.

Изучение возможности применения метода спектральной декомпозиции выполнено как на модельном, так и на реальном волновом поле в пределах одного из месторождений Ноябрьского региона. Для решения поставленных задач были проинтерпретированы сейсмические данные МОГТ 3D на площади 1000 кв.км, проанализированы результаты геофизических исследований и керновый материал для восьми скважин, вскрывающих целевые отложения. Автором выполнено построение модели геологической среды, получение синтетического волнового поля, спектральная декомпозиция и анализ полученных данных в собственном программном модуле, разработанном в ходе диссертационного исследования на базе научно-технического центра ПАО «Газпром нефть».

Для формирования региональной базы данных автором были использованы 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. Весь объем сейсмических данных был собран в единой информационной системе и увязан по реперному отражающему горизонту Б, отвечающему кровле баженовской свиты; выделены и проинтерпретированы региональные границы клиноформенных циклитов, выполнена детальная корреляция внутренних границ циклитов в пределах имеющихся съемок МОГТ 3D. На основании совокупной изменчивости характеристик сейсмических данных и имеющейся геологической информации по скважинам выделены основные геологические тела, характерные для ачимовской толщи

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.

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 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.

Апробация и реализация результатов работы. 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;
- Вынгайхинское - 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-Янгинское – построение концептуальной геологической модели и выделение перспективных участков внутри пластов Ач;
- Северо-Пямалихское - 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».

По теме диссертации опубликовано 9 работ, из них 7 статей в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ.

Основные положения диссертационной работы докладывались на российских и зарубежных конференциях: «III Международная научно-практическая конференция молодых специалистов им. Карпинского» (ВСЕГЕИ, Санкт-Петербург, 2013), Международная научно-практическая конференция молодых специалистов «ГЕОФИЗИКА-2013» (СПбГУ, Петергоф, 2013 г.), II Научно-Техническая конференция молодых ученых ООО «Газпромнефть НТЦ» (Санкт-Петербург, 2013 г.), 6-я международная геолого-геофизическая конференция и выставка «Санкт-Петербург 2014: Геонауки – инвестиции в будущее» (EAGE) (Санкт-Петербург, 2014 г.), Научно-практическая конференция «Сейсмические технологии» (ИФЗ РАН, Москва, 2014 г.), 4-я международная научно-практическая конференция ЕАГО «Нефтегазовая геология и геофизика» (Калининград, 2014 г.), III Научно-Техническая конференция молодых ученых ООО «Газпромнефть НТЦ» (Санкт-Петербург, 2014 г.), Технологический форум компании Schlumberger (Москва, 2014 г.), Доклад

на Научно-Методическом Совете Минприроды России ФГУНПП «Геологоразведка» (Санкт-Петербург, 2014 г.), Российская нефтегазовая техническая конференция SPE (Москва, 2015 г.), Increasing the Knowledge about Oil and Gas Reservoir (Baku, Azerbaijan, 2015 г.), Технологический форум ПАО «Газпром нефть»: Применение сейсмических и других геофизических методов с целью повышения эффективности разработки месторождений углеводородов (Санкт-Петербург, 2016 г.), Российская нефтегазовая техническая конференция SPE (Москва, 2016 г.), Форум ПАО «Газпром нефть» «Ачимовская толща» (Тюмень, 2016 г.).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения. Объем работы составляет 141 страницу, она содержит 8 таблиц, 69 иллюстраций; список использованной литературы включает 36 наименований.

В *первой главе* выполнено детальное геологическое описание объекта исследования и обоснована целесообразность использования метода спектральной декомпозиции для его изучения. Во *второй главе* на основании имеющихся литературных данных рассмотрены основные алгоритмы спектральной декомпозиции волнового поля и дано обоснование оптимального метода, что в дальнейшем подтверждено на практическом результате. При помощи моделирования получено синтетическое волновое поле, по заданной модели выклинивающегося пласта переменной акустической жесткости. В *третьей главе* выполнено исследование спектральных характеристик модельного поля, определены основные факторы, влияющие на возникновение частотных аномалий. В *четвертой главе* описаны основные подходы к анализу результатов спектральной декомпозиции, а также предложена оптимизация алгоритма RGB-представления. Полученный результат позволил выделить геологические тела внутри продуктивного пласта, и составил основу модели, использованной при планировании бурения. Результаты бурения показывают высокую степень достоверности прогноза и подтверждают построенную модель. Положительный результат был экстраполирован на Ноябрьский регион в рамках регионального изучения перспективности ачимовских отложений. *Пятая глава* описывает алгоритм получения детального плана распространения геологических объектов в пределах исследуемой области.

ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

Первое защищаемое положение. 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

В рамках исследования результаты применения технологии НВП использованы для изучения строения продуктивного ачимовского пласта одного из месторождений Западной Сибири. Интеграция результатов интерпретации НВП и исследований керна позволяет установить наличие локальных зон лавинной седиментации, связанных с развитием системы транспортировки и разгрузки осадочного материала, в виде каньонов (каналов транспортировки) и конусов выноса. Отложения изучаемого пласта вне указанных геологических объектов характеризуются глинистым составом, что отражает отсутствие коллектора. Аномалия спектральных данных, интерпретируемая как тело конуса выноса, характеризуется преимущественно песчаным разрезом с градационной слоистостью. Наличие внутренних каналов подтверждается характером изменения дебита скважины, что свидетельствует об улучшении фильтрационных свойств внутри распределительных каналов. Аномалии, определенные как каналы транспортировки материала, характеризуются значительным по мощности разрезом конгломератов. Таким образом, выделяемые спектральные аномалии согласуются с методами прямого изучения пласта и отражают наличие коллектора в ачимовском интервале разреза.

Интерпретация имеющейся геолого-геофизической информации, позволяет отнести ачимовские коллектора к дистальной части комплекса, что отражает их накопление в более глубоководной части бассейна. Тезис подтверждается выполненным сейсмофациальным анализом, анализом спектральных характеристик, а также анализом современных обстановок осадконакопления. Сделанные выводы подкрепляются анализом керна, показывающим высокую степень корреляции между спектральными характеристиками и обстановками седиментации (рис. 1).

Результаты интерпретации позволяют выполнить прогноз емкостных свойств, выделенных геологических тел. При этом использование предлагаемых подходов значительно повышает детальность и точность прогнозирования эффективной мощности.

Результаты, полученные в рамках изучаемого месторождения, экстраполированы на Ноябрьский регион, для чего было выполнено обобщение геолого-геофизической информации на площади около 180 000 кв.км. Указанная территория объединяет более 20 действующих месторождений ПАО «Газпром нефть». Суммарная площадь сейсмических работ 3D составляет более 20 000 кв.км. В рамках исследования выполнено обобщение, взаимная увязка сейсмических данных и их интерпретация с использованием технологий НВП и «цифровой RGB» для получения единого плана перспективных объектов, расположенных в дистальных частях клиноформных комплексов. Получен региональный план (рис. 2) положения геологических тел, связанных с лавинной седиментацией, и, следовательно, с повышенной вероятностью наличия коллектора. Установлена однозначная связь продуктивности ачимовских отложений с наличием геологических тел (каньонов и конусов выноса), которые могут быть закартированы по результатам спектрального анализа волнового поля.

Полученные результаты являются актуальными и значимыми с точки зрения поиска новых перспективных объектов для поддержания и наращивания уровня добычи нефти в Ноябрьском регионе.

Второе защищаемое положение. 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"

Спектральная декомпозиция волнового поля заключается в разложении сейсмической трассы по определенному набору функций. В случае оконного преобразования Фурье разложение выполняется по гармоникам, ограниченным заданным временным окном. При использовании непрерывного вейвлет преобразования (НВП) базисом разложения выступает семейство вейвлетов - локальных волновых функций с нулевым интегральным значением.

При рассмотрении указанных подходов спектрального разложения устанавливается более детальный результат при использовании НВП за счет лучшей локализации по времени, а также отсутствия влияния функции окна.

Выдвинутый тезис подтвержден сравнением методик при изучении целевого пласта. В рамках оконного преобразования Фурье рассмотрены

различные по длительности оконные функции, для НВП использованы разные типы вейвлетов (рис. 3). Как показывает сравнение методик, оптимальный результат достигается при использовании НВП по вейвлетам Риккера.

Для изучения вопроса, какие параметры геологической среды влияют на результаты спектрального разложения, рассмотрена синтетическая модель выклинивающегося пласта переменной акустической жесткости, которая может рассматриваться как аппроксимация ачимовского типа разреза.

Анализ спектральных характеристик синтетического волнового поля позволил установить приуроченность спектральных аномалий к выклинивающейся части пласта. Тезис подтверждается анализом RGB-куба, а также сравнением графиков спектральных характеристик для различных значений акустического импеданса выклинивающегося пласта.

Максимальная интенсивность аномалий спектра НВП наблюдается в пределах интерферирующей части клина. Таким образом, результаты спектральной декомпозиции позволяют выделять объекты, обуславливающие интерференционный характер поля (рис. 4).

С целью определения параметров, влияющих на результаты НВП, выполнен анализ изменения спектральных характеристик в области интерференционного взаимодействия отражений от кровли и подошвы клина. Установлено, что с уменьшением мощности пласта наблюдается постепенное увеличение доминантного значения частоты, что создает предпосылки для прогноза эффективной мощности коллектора при изучении ачимовской толщи.

Таким образом, по модельному волновому полю установлено, что основным влияющим параметром является интерференция, связанная с мощностью пласта. Акустические свойства пласта при этом не оказывают влияние на характер аномалии, сказываясь только на амплитуде спектра (рис. 5).

Полученный вывод позволяет определить метод НВП как наиболее оптимальный для выделения локальных геологических тел (каналов, конусов выноса и пр.), а также для определения изменений в расчлененности разреза, приводящих к смене характера интерференции.

Оптимальность технологии НВП с RGB-смешиванием для решения задачи определения геометрии и внутреннего строения геологических тел ачимовской толщи подтверждается сравнением со стандартными атрибутами (оценка амплитуд, акустического импеданса); RGB-

представление результата характеризуется большей детальностью при выделении маломощных геологических объектов ачимовского комплекса и определении их внутреннего строения.

В рамках исследования обоснован алгоритм получения «цифрового RGB-массива», что позволяет выполнять количественный анализ результатов без использования специальных программных средств. Методика сводится к решению двух задач:

- Разработка способа развертки объемной цветовой палетки;
- Разработка алгоритма отображения многомерного RGB-массива – приведение его стандартному трехмерному виду, когда каждой точке отвечает одно значение амплитуды

В ходе исследования предложен алгоритм развертки трехмерного цветового куба в линейную палетку, путем послойного разложения, что послужило решением первой обозначенной задачи. Предлагаемый алгоритм позволил создать базу цветовых шкал для использования в рамках предлагаемого метода интерпретации.

Решение второй обозначенной задачи выполнено путем линейной комбинации входных амплитудных массивов с весовыми множителями, определенными в ходе исследования.

Предлагаемая технология характеризуется научной новизной и практической значимостью, так как позволяет без потери качества выполнять количественную интерпретацию RGB-массивов (рис. 6), а также осуществлять их импорт в геологическую модель.

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

Для интерпретации результатов спектральной декомпозиции обосновано использование атрибута «спектральная кривая», описывающего изменение спектральных характеристик вдоль заданного целевого отражения. Алгоритм вычисления указанного атрибута заключается в расчете сечений амплитуд по некоторому набору частотных характеристик, получаемых в результате реализации НВП, с учетом поверхности целевого отражения. В дальнейшем указанные сечения формируют трехмерный куб, вертикальная ось которого отражает изменение частоты. Таким образом, каждая трасса частотного куба

описывает спектральную кривую по анализируемому целевому отражению (рис. 7).

Наличие спектральной кривой позволяет использовать различные подходы для оценки связи частотных параметров со свойствами анализируемого пласта. Рассмотрены как простые алгоритмы анализа, такие как оценка амплитуды определенной частоты и оценка затухания спектра, так и более сложные – использование метода главных компонент и самоорганизующихся сетей Кохонена.

В рамках изучения применимости атрибута «спектральная кривая» выполнено сравнение точности прогнозирования эффективной мощности с использованием результатов амплитудного анализа волнового поля, спектральных характеристик НВП, а также различных параметров спектральной кривой для целевого отражающего горизонта. Оценка выполнялась на основании графиков зависимости анализируемой характеристики волнового поля от изменения параметров пласта. Таким образом, как показывает выполненный анализ, наиболее точный прогноз параметра пласта (эффективная мощность) осуществляется с использованием главной компоненты спектральной кривой (рис. 8).

Наличие атрибута «спектральная кривая» позволяет выполнить классификацию изучаемой территории по форме спектральной кривой, тем самым получить дополнительную информацию при построении геологической модели пласта.

Анализ атрибута «спектральная кривая» позволяет получить более точный прогноз эффективных толщин в межскважинном пространстве, что подтверждено сравнением корреляции различных параметров волнового поля с параметром целевого пласта. Рассматриваемая разработка является практически значимой, так как позволяет снизить неопределенность геологической модели и получить дополнительный инструмент моделирования свойств при оценке распространения коллектора.

Апробация и применение результатов

Полученные результаты исследования легли в основу построения геологической модели продуктивного ачимовского интервала на рассматриваемом месторождении. Пробурено 13 горизонтальных скважин, подтверждающих прогнозируемое строение комплекса и характеризующихся промышленным притоком нефти. Основываясь на

полученных результатах, запланировано дальнейшее эксплуатационное бурение трех кустов (22 скважины) в течение 2017-2020 гг (рис. 9).

Предлагаемые подходы к анализу спектральных данных были дополнительно опробованы на ряде месторождений компании ПАО «Газпром нефть» в пределах отечественных и зарубежных осадочных бассейнов.

По теме диссертации опубликовано 9 работ, из них 7 статей в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ. Основные положения диссертационной работы докладывались на 14 российских и зарубежных конференциях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках исследования подробно описано геологическое строение продуктивных ачимовских пластов рассматриваемого месторождения, при помощи кернового 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 методом 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 и программный модуль для расчета цифровых RGB-массивов. Для их визуализации в геологических пакетах, создана база данных псевдотрехмерных палеток для предложенной методики;

2) Разработан алгоритм и программный модуль для 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.). По итогам бурения с учетом результатов, произведено стратегическое планирование дальнейшей разработки продуктивного объекта, направленное на постепенное смещение от разбуренной части в области, не затронутые бурением. Намечено бурение еще трех кустовых площадок (22 скважины) в основной части конуса в течение последующих двух лет.

Положительный результат бурения позволяет произвести дальнейшее планирование стратегии разработки с учетом новых полученных данных, основанных на интерпретации результатов спектральной декомпозиции. Полученные 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.

Практические результаты диссертации могут быть рекомендованы для использования при изучении других месторождений, характеризующихся схожим геологическим строением целевых пластов.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России

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

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

3. **Буторин А.В.** 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

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.** Оценка потенциала тюменской свиты в пределах Ноябрьского региона Западной Сибири / А.В. Буторин, Р.Р. Зиннурова, М.Ю. Митяев, А.В. Онегов, И.Ф. Шарифуллин, М.А. Виноходов // Нефтяное хозяйство. – 2015. – №12. – с. 41-43

6. **Буторин А.В.** Использование современных алгоритмов анализа сейсмических данных для определения потенциала ачимовских отложений Ноябрьского региона / А.В. Буторин, Р.Р. Зиннурова, М.Ю. Митяев, А.В. Онегов, И.Ф. Шарифуллин, М.А. Виноходов // Нефтяное хозяйство. – 2015. – №12. – с. 52-54

7. **Буторин А.В.** Строение продуктивного клиноформного пласта по данным сейсморазведки / А.В. Буторин // Геофизика. – 2015. – №1. – с. 10-18

В других изданиях:

8. **Butorin A.V.** Application of wavelet spectral decomposition for geological interpretation of seismic data / A.V. Butorin // Journal of Geological Resource and Engineering. – 2016. – vol. 4, No.5 – p. 231-241

Буторин А.В. Применение спектральной декомпозиции по вейвлетам с целью геологической интерпретации сейсмических данных / А.В. Буторин // Journal of Geological Resource and Engineering. – 2016. – vol. 4, No.5 – p. 231-241

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

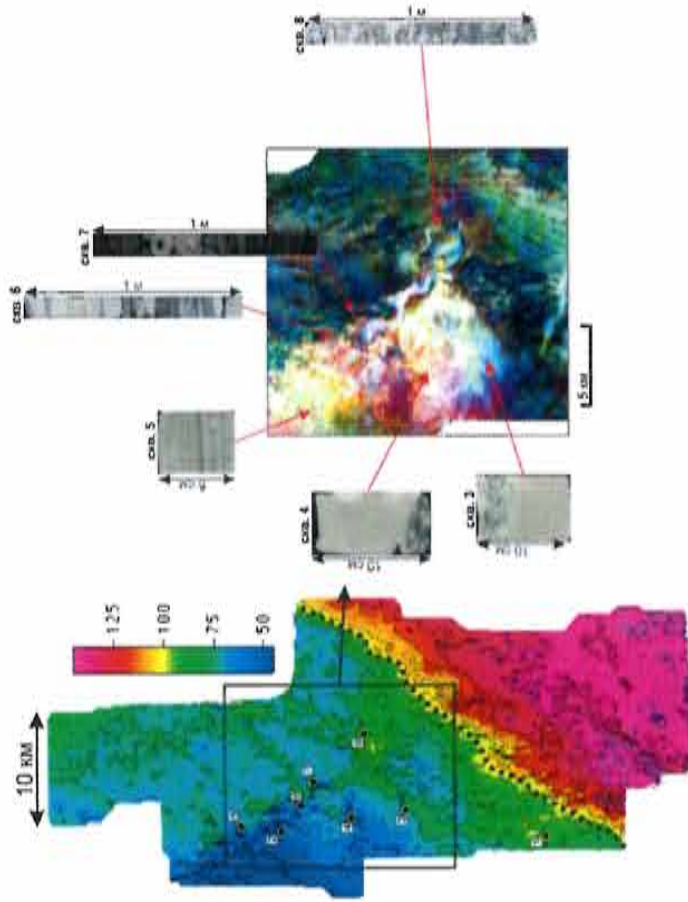


Рис. 1 Карта временной мощности целевого комплекса (слева), сопоставление RGB-карты и материалов керна (справа).

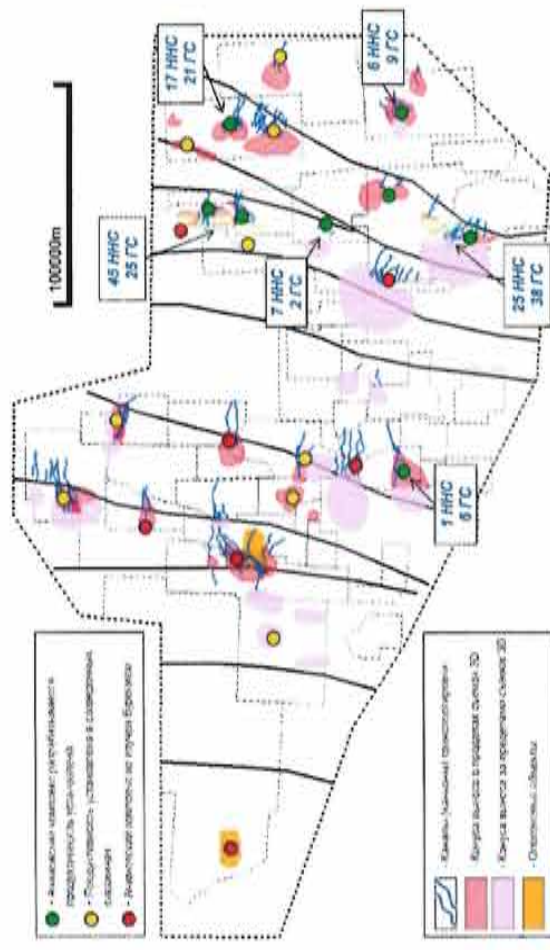


Рис. 2 Региональный план перспективных геологических объектов ачимовского комплекса на территории Ноябрьского региона (ННС – наклонно-направленная скважина, ГС – горизонтальная скважина)

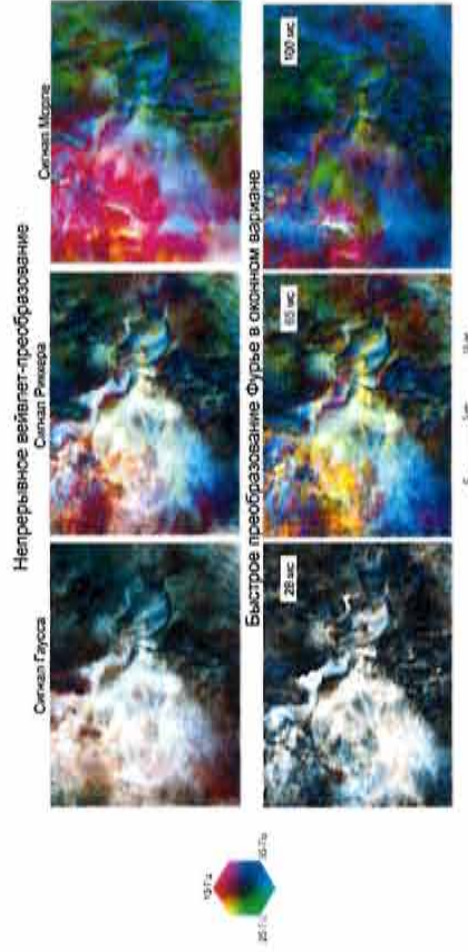


Рис. 3 Сравнение RGB-карт по целевому пласту по НВП (сверху) и преобразованию Гэбора (снизу).

Карта по кровле клина

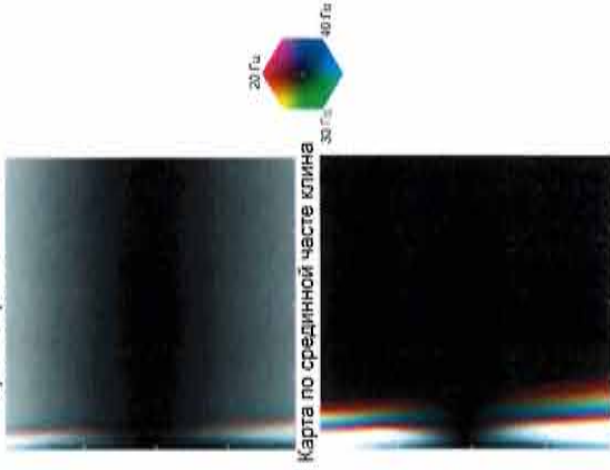


Рис. 4 RGB-разрез клина, и соответствующее ему волновое поле (слева), карта спектрального смешивания по кровле и срединной части клина (справа).

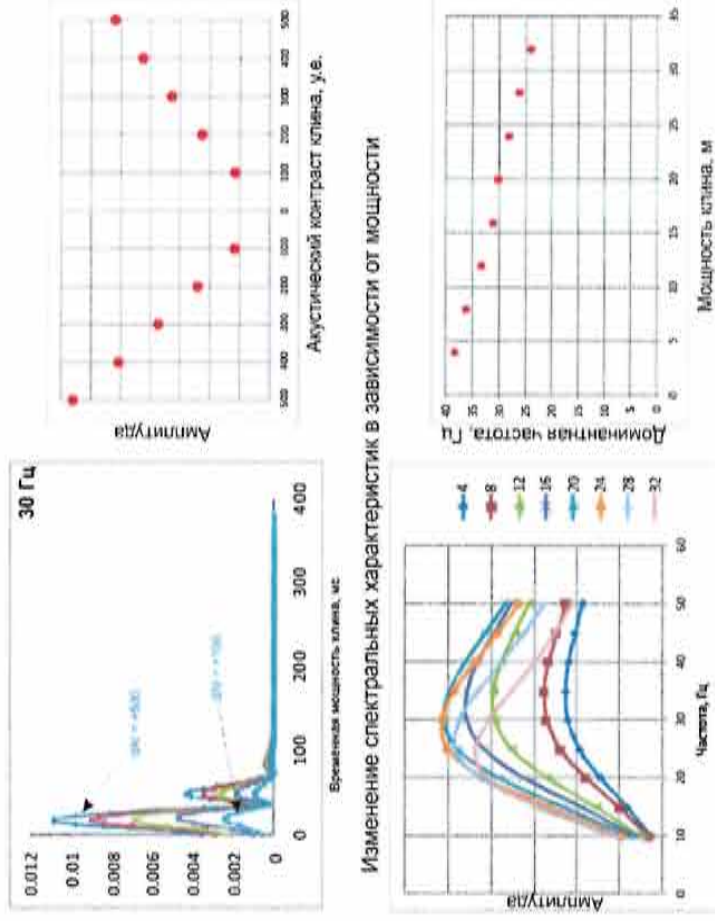


Рис. 5 Изменение спектральных характеристик в зависимости от акустической жесткости (сверху) и мощности пласта (снизу)

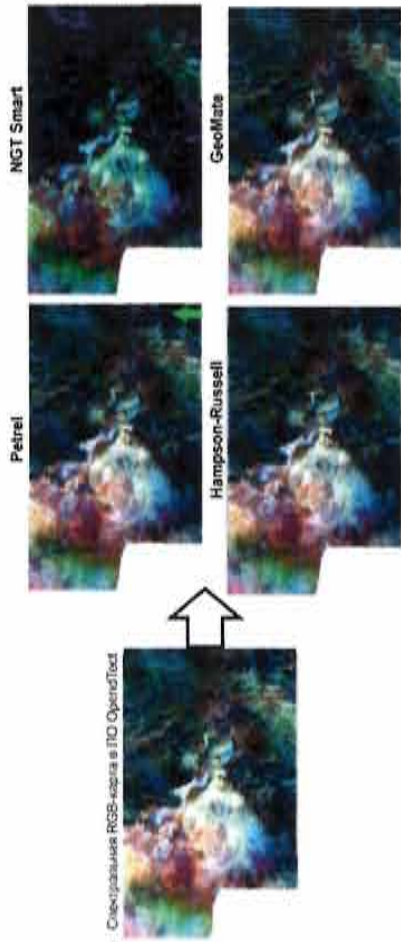


Рис. 6. Сравнение стандартного алгоритма RGB-визуализации (слева) с предлагаемой методикой линейаризации (справа).

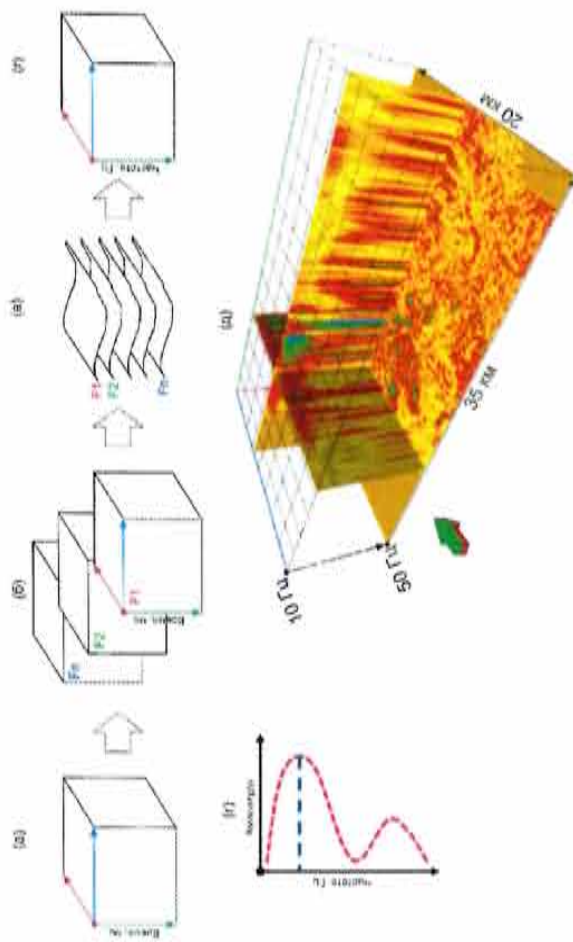


Рис. 7 Алгоритм расчета частотного куба НВП (спектральной кривой): а) исходное волновое поле; б) набор кубов частотных характеристик; в) Карты амплитуд по частотам вдоль целевого отражения; г) Результирующий частотный куб; г) Вид трассы частотного куба – спектральная кривая; д) Пример применения технологии к целевому ачимовскому пласту.

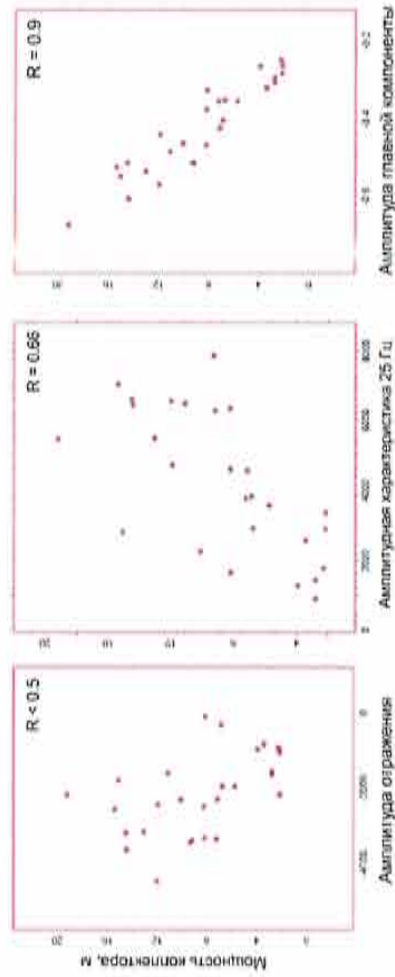


Рис. 8 Сравнение корреляции эффективных толщин с амплитудой отражения (слева), амплитудой частоты 25 Гц (в центре), главной компонентой спектральной кривой (справа), R – значение коэффициента корреляции.

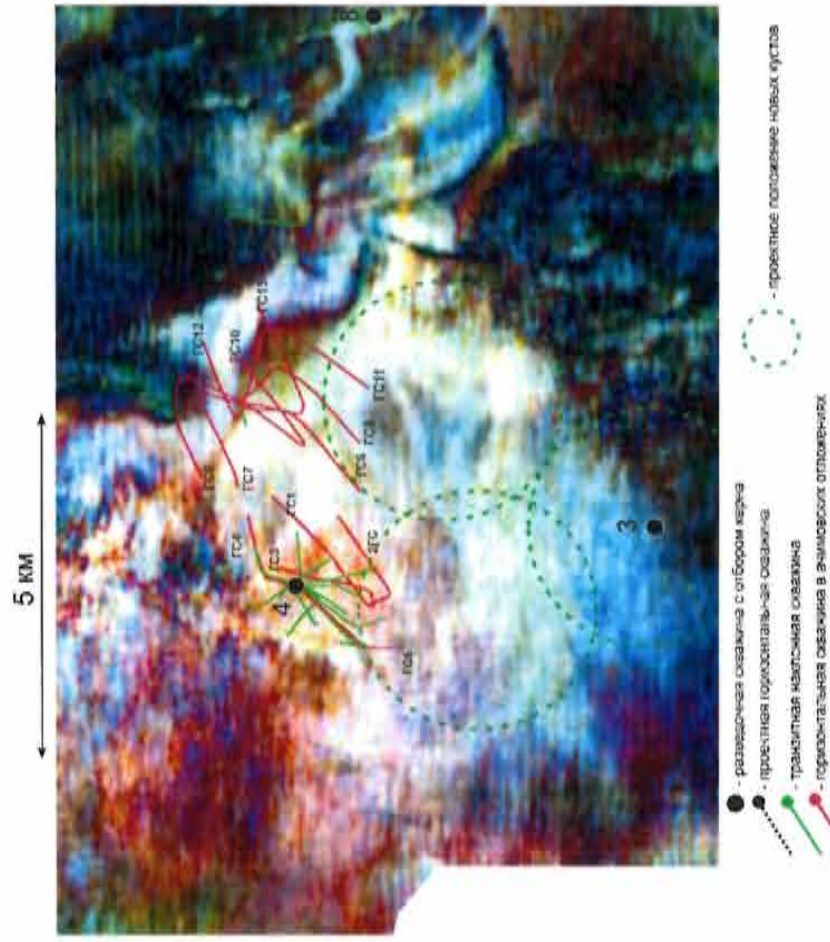


Рис. 9 Схема расположения пробуренных скважин в 2014-2016 гг. на RGB-карте центрального конуса выноса.