

На правах рукописи



Волков Дмитрий Сергеевич

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗА
НЕФТЕГАЗОПЕРСПЕКТИВНЫХ ОБЪЕКТОВ НА МАЛОИЗУЧЕННЫХ
БУРЕНИЕМ ПЛОЩАДЯХ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА
СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ

1.6.11 – Геология, поиски, разведка и эксплуатация нефтяных и газовых
месторождений

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в Обществе с ограниченной ответственностью
«Научно – исследовательский институт природных газов и газовых технологий
– Газпром ВНИИГАЗ» (ООО «Газпром ВНИИГАЗ»)

**Научный
руководитель**

Крылов Дмитрий Николаевич, доктор технических наук,
главный научный сотрудник Лаборатории научно-
методического сопровождения проектов разработки
ООО «Газпром ВНИИГАЗ»

**Официальные
оппоненты**

Лобусев Михаил Александрович, доктор геолого-
минералогических наук, доцент, профессор кафедры общей и
нефтегазопромысловой геологии РГУ нефти и газа
имени И.М. Губкина»

Ахиярова Елена Робертовна, кандидат технических наук,
менеджер по интерпретации сейсморазведки ООО «Атойл
Технолоджис»

**Ведущая
организация**

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Российский университет
дружбы народов имени Патриса Лумумбы».

Защита диссертации состоится «15» мая 2024 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 75.1.011.02, созданного на базе ООО «Газпром ВНИИГАЗ», по адресу: 142717, Московская область, г.о. Ленинский, п. Развилка, ул. Газовиков, зд. 15, стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ООО «Газпром ВНИИГАЗ» и на сайте: <https://vniigaz.gazprom.ru>

Автореферат разослан «__» апреля 2024г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук



Самсоненко Наталья Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Воспроизводство и развитие минерально-сырьевой базы углеводородов (УВ) является приоритетным направлением геологоразведочных работ. Особую актуальность данная проблема приобретает в связи с высокой степенью разведанности и выработанности эксплуатируемых месторождений нефти и газа, залежи которых в основном сосредоточены в антиклинальных ловушках. Возникает необходимость изучения и освоения новых объектов, обладающих высоким потенциалом открытия ловушек УВ неантиклинального и комбинированного типов, в том числе в зонах распространения геологических тел и сложнопостроенных коллекторов (малые толщины, сложная пространственная геометрия, незначительный контраст упругих свойств, высокая изменчивость фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) по латерали и вертикали, неоднородное пустотное пространство).

Большинство поисковых объектов со сложным строением сосредоточено на перспективных участках, расположенных в районах крупных месторождений с развитой инфраструктурой (Уренгойское НГКМ, Заполярное ГКМ), в труднодоступных транзитных зонах и в акватории Арктических морей (Печорское море, Баренцево море, Карское море и др.). Эти площади покрыты съемкой высокой плотности/кратности МОГТ-2D/3D, но недостаточно изучены бурением (в большинстве случаев единичным числом поисковых и разведочных скважин), что накладывает дополнительные ограничения на использование стандартных интерпретационных подходов при исследовании недр и ведет к снижению достоверности получаемых результатов.

С целью повышения качества прогноза зон развития коллектора со сложным строением и его фильтрационно-емкостных свойств в рамках детализации геологических моделей недостаточно исследованных бурением площадей, необходимо адаптировать и усовершенствовать методы динамического анализа сейсмических данных применительно к текущим геолого-геофизическим условиям изученности с привлечением данных по разрабатываемым месторождениям-аналогам.

В связи с недостаточной изученностью ряда вопросов в рамках данной тематики, разработка и совершенствование методик прогноза нефтегазоперспективных геологических объектов с применением динамического анализа сейсмических данных на малоизученных бурением площадях представляет собой актуальную научную и прикладную задачи.

Степень разработанности темы

Проведенное автором исследование малоизученных бурением площадей с использованием результатов динамической интерпретации сейсмических данных является продолжением развития технологии анализа амплитудно-частотных характеристик волнового поля, доказавшим свою эффективность на ряде месторождений нефти и газа.

Первоначальный вклад в развитие методов динамической интерпретации сейсмических данных оценить затруднительно ввиду конфиденциальности ранних исследований. Работы М. Форреста, В.В. Черлина, А.А. Сергеева, Савита, Пана, де Бремакера, Коффода, Бортфельда, Шуэ, Острандера, Г.Н. Гогоненкова и многих других исследователей положили начало анализу амплитуд в сейсморазведке. Выявление залежей на первых этапах поисков не представляло сложностей ввиду относительной простоты геологического строения изучаемых участков недр, что позволило сформировать качественные критерии АЧХ волновой картины, соответствующих прямым признакам УВ в отсутствии скважинной информации, и использовать их для картирования ловушек.

Современные исследования, посвященные методам динамического анализа сейсмических данных, охватывают более широкий спектр решаемых задач. Развитию комплекса методик способствовало усложнение геологических условий и изучаемых физико-геологических моделей среды наряду с требованиями к повышению качества результатов прогноза. Значительный вклад в развитие динамических интерпретационных методик внесли G Partyka., J Castagna., M Widess., (изучение спектральных особенностей сейсмической трассы), K.J. Marfurt, S. Chopra, A. Barnes, B. Alaei, С.Н. Птецов (сейсмические атрибуты), F. Hiltermann, W. Rutherford (AVO-анализ), D. Hampson, B. Russel, И.К. Кондратьев, Д.Н. Крылов, И.И. Приезжев, Ю.П. Ампиров (инверсионные преобразования) и другие известные ученые.

Однако данные подходы критичны к наличию скважинных данных. Опубликованный опыт их использования в рамках исследования малоизученных бурением площадей проанализирован в теоретическом обзоре диссертации.

Цель работы

Усовершенствование методики прогноза перспективных геологических объектов со сложным строением на малоизученных бурением площадях с помощью комплексирования современных интерпретационных подходов динамического анализа сейсмических данных и привлечения информации по разрабатываемым месторождениям-аналогам, а также разработка независимой методики количественного прогноза эффективных толщин на основе

пропорционального смешивания частотных составляющих спектральной декомпозиции волнового поля.

Основные задачи работы

1. Обзор и анализ современных методик динамической интерпретации, потенциально применимых при исследовании неосвещенных бурением интервалов разреза и площадей;

2. Выбор объектов исследования, отличных по геологическому строению и набору фактических данных, включая материалы глубокого бурения, опробования, испытаний, отбора керна, анализа шлама, ГИС;

3. Поиск, обобщение и анализ априорной геолого-геофизической информации по объектам исследования и разрабатываемым месторождениям-аналогам с целью ее интеграции в процесс динамической интерпретации сейсмических данных;

4. Анализ информативности методик динамической интерпретации сейсмических данных при выделении нефтегазоперспективных объектов и прогнозе их ФЕС на участках акватории Печорского моря (на основе одной скважины на площади, охарактеризованной данными МОГТ-3D);

5. Изучение возможностей учета результатов качественной геолого-геофизической интерпретации в виде входных данных при выполнении количественного прогноза эффективных толщин на основе спектральной декомпозиции волнового поля;

6. Синтез данных ГИС с применением петроупругого моделирования при недостатке исследований, характеризующих упругие свойства пород, с целью расширения информации об упругих параметрах среды, используемых для повышения достоверности прогноза ФЕС.

Объект исследования

Сложнопостроенные природные резервуары на площадях Тимано-Печорской и Западно-Сибирской НГП, которые охарактеризованы данными МОГТ-3D в условиях недостаточности фактических материалов глубокого бурения.

Научная новизна работы:

1. Установлена ограниченность прогноза ФЕС в межскважинном пространстве на основе изучения изменений упругих характеристик среды по данным ГИС и выявлена высокая вероятность появления ошибок I и II рода при использовании стандартных методик количественной интерпретации на базе динамического анализа для малоизученных бурением площадей шельфа Печорского моря;

2. Выявлены УВ-перспективные геологические объекты на ряде площадей Печорского моря (СЛЛ: меандрирующие русла, дельта бокового прорыва,

карбонатные постройки «пинакл», зоны приподнятых участков мелководного шельфа) с помощью комплексного анализа сейсмических атрибутов, послужившего основой, дополняемой данными по разрабатываемым месторождениям-аналогам, для количественного прогноза ФЕС;

3. Выявлены геологические объекты в нижнесилурийских отложениях акваториального продолжения Хорейверской НГО, интерпретируемые по амплитуде и типу волновой картины как «карбонатные постройки», в одной из которых получен непромышленный приток нефти дебитом 0,275 м³/сут;

4. Разработана и научно обоснована независимая методика прогноза эффективных толщин с использованием анализа трех частотных диапазонов данных спектральной декомпозиции волнового поля при недостаточности данных глубокого бурения на примере конуса выноса ачимовской толщи;

5. Обоснована необходимость синтеза кривых интервального времени пробега поперечной волны посредством петроупругого моделирования с привлечением данных по месторождениям-аналогам, что позволило расширить возможности динамического анализа сейсмических данных при выполнении прогноза ФЕС малоизученных бурением поисковых объектов и выявлении зон глинизации;

6. Установлена применимость более полного количественного прогноза ФЕС для выявленных в интервале ачимовских отложений ЗС НПП продуктивного конуса выноса и питающих каналов на основе усовершенствованной методики динамического анализа с привлечением данных по разрабатываемым месторождениям-аналогам.

Теоретическая и практическая значимость работы

На основании выполненных исследований разработан новый подход и усовершенствованы используемые методики динамического анализа сейсмических данных для поиска и прогноза потенциальных ловушек УВ на малоизученных бурением площадях применительно к объектам исследования. Рассмотрены возможности и ограничения методов динамической интерпретации при детальном изучении геологического строения площадей, охарактеризованных одной скважиной, на примере первого объекта исследования - участка недр в Печорском море.

На основе решения прямой задачи изучена возможность использования метода спектральной декомпозиции с целью количественной оценки эффективных толщин для второго исследуемого объекта - конуса выноса ачимовской толщи. Разработанный подход применим в качестве независимой методики прогноза эффективных толщин и/или альтернативы инверсионным преобразованиям с учетом ограниченности их выполнения (наличие входных данных) и неоднозначности/неустойчивости результатов.

Проанализирована возможность и необходимость расширения набора упругих свойств посредством моделирования интервального времени пробега поперечной волны для ачимовских отложений исследуемой площади, где четыре скважины (50% от общего числа) вскрыли коллектор. Увеличение получаемой в процессе интерпретации информации сократило неоднозначность количественного прогноза ФЕС и улучшило его достоверность.

Предложенные в диссертационной работе критерии позволят обеспечить надежность подготовки поисковых объектов к ГРП, тем самым, повысить качество и эффективность поискового бурения при выполнении ГРП за счет снижения числа скважин, не вскрывших коллектор.

Методы исследований:

- обобщение отечественных и зарубежных публикаций по проблеме исследования малоизученных бурением площадей с помощью интерпретационных методик сейсморазведки;
- подготовка петрофизического обоснования для динамического анализа сейсмических данных;
- анализ технологии динамической интерпретации сейсмических данных при отсутствии кондиционных материалов каротажа и акустического контраста пород в поле упругих свойств;
- решение прямой и обратной задачи при изучении возможностей количественной интерпретации результатов спектральной декомпозиции;
- петроупругое моделирование с целью дополнительного синтеза кривой интервального времени пробега поперечной волны и расширения возможностей динамического анализа сейсмических данных.

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты атрибутного анализа, дополняемые количественными оценками по разрабатываемым месторождениям-аналогам, являются устойчивым базисом прогноза ФЕС перспективных геологических объектов со сложным строением на малоизученных бурением площадях шельфа Печорского моря;
2. В нижнесилурийских отложениях акваториального продолжения Хорейверской НГО на основе интерпретации амплитудных аномалий волнового поля и подбора аналогов на временных разрезах по месторождениям ТП НГП выявлены УВ-перспективные карбонатные постройки;
3. При недостаточности данных глубокого бурения разработанная методика пропорционального смешивания карт трех частотных составляющих спектральной декомпозиции является предпочтительной альтернативой инверсионным

преобразованиям, обеспечивающей высокую достоверность прогноза эффективных толщин (не превышающих 25% длины волны) изучаемого объекта в ачимовских отложениях Западно-Сибирской НГП;

4. Синтез кривых ГИС, характеризующих упругие свойства среды (плотности, интервальные времена пробега продольной и поперечной волны), с использованием данных по разрабатываемым месторождениям-аналогам является методом существенного повышения достоверности прогноза ФЕС коллектора со сложным строением в ачимовской толще и выявления зоны глинизации.

Личный вклад автора

Диссертация базируется на результатах исследований, выполненных лично автором или с его непосредственным участием в области динамического анализа сейсмических данных. В период с 2017 по 2023 год с личным участием автора (70 %) выполнялись работы по оценке перспектив ГРП и прогнозу ФЕС на малоизученных бурением лицензионных участках Западно-Сибирской и Тимано-Печорской НГП, по итогам которых получены защищаемые научные положения и публикации (статьи в журналах ВАК РФ).

Степень достоверности

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций основана на общепринятых теоретических представлениях, обобщенных в ходе анализа зарубежных и отечественных публикаций. Достоверность исследования подтверждена формированием физико-геологической модели среды по фактическим данным, а также результатами применения предлагаемой методики на полевых материалах. Усовершенствованные методы динамической интерпретации сейсмических данных успешно опробованы на примере сложнопостроенных коллекторов ачимовских отложений ЗС НГП, терригенных и карбонатных продуктивных отложений акваториального продолжения ТП НГП.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы апробированы на международных научно-практических и межрегиональных конференциях, совещаниях, семинарах:

- Российская нефтегазовая техническая конференция SPE (г. Москва, 2020);
- Международная конференция «Рассохинские чтения» (УГТУ, г. Ухта, 2022);
- V Всероссийская молодежная научная конференция «Актуальные проблемы нефти и газа» (ИПНГ РАН, г. Москва, 2022) – диплом III степени;
- XIV Всероссийская конференция молодых ученых, специалистов и студентов «Новые технологии в газовой промышленности» (газ, нефть, энергетика)

(РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, 2022) – диплом I степени;

– Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Проблемы геологии, разработки и эксплуатации месторождений, транспорта и переработки трудноизвлекаемых запасов тяжелых нефтей» (УГТУ, г. Ухта, 2022);

– Международная конференция «Рассохинские чтения» (УГТУ, г. Ухта, 2023);

– XI Молодежная международная научно-практическая конференция «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность» (ООО «Газпром ВНИИГАЗ», г. Москва, 2023).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 10 работ, в том числе 3 статьи, опубликованных в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России. В данных работах отражены все защищаемые научные положения. 5 работ являются тезисами, опубликованными в сборниках трудов всероссийских и международных конференций, индексируемых в РИНЦ.

Структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 113 страниц, в том числе 61 рисунок и 8 таблиц. Список литературы включает 69 наименований.

Благодарность

Автор благодарит своего научного руководителя – д. т. н. Д.Н. Крылова за конструктивную критику, руководство и помощь в подготовке диссертации на протяжении всего периода работы. Также автор благодарит сотрудников кафедры сейсмологии и геоакустики МГУ имени М.В. Ломоносова, в особенности к.г.-м.н. Шалаеву Н.В. - руководителя автора в процессе обучения в аспирантуре. Автор выражает благодарность: к.г.-м.н. Колоколовой И.В. (ФГБУ «ВНИГНИ»), к.г.-м.н. Ростовщикову В.Б. (ФГБОУ ВО «УГТУ»), Волкову Р.П. (ООО «Газпромнефть – Технологические Партнерства»), Зорькиной В.Я., Абарбанелю Е.Г., Швачко Е.В., Творогову М.А., к.г.-м.н. Галиевой А.Р., д.г.-м.н. Полякову Е.Е., д.г.-м.н. Скоробогатову В.А., (все – ООО «Газпром ВНИИГАЗ») за предоставленные материалы, советы, поддержку, ценные замечания и помощь в процессе работы над диссертацией.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы

цели и задачи работы, выносимые на защиту положения, раскрыта научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, представлены возможные методы исследования.

В первой главе приведен теоретический обзор и выполнено обобщение современных методик динамической интерпретации сейсмических данных, потенциально применимых при исследовании неосвещенных бурением интервалов разреза и площадей. Продемонстрированы преимущества и ограничения методов, что указывает на необходимость совершенствования интерпретационных подходов динамического анализа при решении задач, поставленных в работе.

В рассмотренных публикациях, посвященных тематике исследования, отмечается необходимость использования амплитудно-частотных характеристик волнового поля (качественная интерпретация) и упругих свойств пород (количественная интерпретация) как наиболее важного критерия выделения нефтегазоперспективных объектов и прогноза ФЕС. Практика показала, что не учет этих параметров волнового поля приводит к снижению качества и достоверности результатов интерпретации, а также к увеличению рисков «неуспеха» при поисковом бурении и дальнейших ГРП.

Однако повышение надежности динамической интерпретации в условиях изучения сложнопостроенных коллекторов при недостаточном количестве данных глубокого бурения практически невозможно без дополнительных приемов, включающих решение прямой задачи и использование информации по разрабатываемым месторождениям аналогам. Эти интерпретационные подходы апробированы на полевых материалах.

В качестве первого объекта исследования выбраны две площади на шельфе Печорского моря, перспективные на поиски залежей УВ в сложнопостроенных природных резервуарах. На каждом участке содержится массив данных МОГТ-3D и пробурена одна скважина с ограниченным комплексом ГИС. В связи с этим необходимо рассмотреть возможность учета априорной геологической информации о строении исследуемых отложений с использованием данных по разрабатываемым месторождениям – аналогам ввиду низкой изученности бурением площадей, что критично для методов динамического анализа.

Дальнейшая оценка потенциала динамической интерпретации при решении задач, поставленных в работе, предусматривает выбор другого объекта исследования, имеющего отличное от предыдущего геологическое строение и охарактеризованного бóльшим числом скважинных данных. Поэтому, вторым перспективным объектом исследования выбран сложнопостроенный коллектор ачимовской толщи на одной из площадей в Пур-Тазовской НГО Западно-Сибирской НГП. На участке содержится массив данных МОГТ-3D и пробурено 18

скважин (с ограниченным комплексом методов ГИС, характеризующих упругие свойства пород), семь из которых достигли ачимовских отложений и четыре вскрыли коллектор.

С учетом сложности геологического строения ачимовской толщи, необходимо изучить возможность дополнительного использования результатов качественной геолого-геофизической интерпретации в виде входных данных при выполнении количественного прогноза эффективных толщин.

Кроме того, при недостатке методов ГИС, характеризующих упругие свойства пород, важно в полном объеме восстановить информацию об упругих параметрах среды для подготовки качественного петрофизического обоснования динамической интерпретации и, следовательно, повышения достоверности количественного прогноза ФЕС.

Во второй главе проанализированы возможности и ограничения динамического анализа сейсмических данных при поиске нефтегазоперспективных объектов и прогнозе их ФЕС на малоизученных бурением площадях Печорского моря. Объект исследования представлен полифациальными сложнопостроенными верхнепермскими терригенными, верхнекаменноугольно-нижнепермскими и нижнесилурийскими карбонатными отложениями, продуктивность которых доказана на суше и акваториальном продолжении ТП НГП. В пределах изучаемого участка отложения вскрыты двумя скважинами, в которых получены притоки УВ (непромышленного и промышленного значения).

В верхнепермских терригенных отложениях коллектор представлен преимущественно полимиктовыми песчаниками, алевролитами, имеющими сложное строение емкостного пространства: наличием первичных пор и их сочетанием со вторичными (поры растворения карбонатного цемента). Для высокоёмких коллекторов доля пористости растворения составляет от 40-100% общей пористости. Неоднородность фильтрационно-емкостных свойств также обусловлена фациальной изменчивостью и требует более детального изучения. Залежи сосредоточены преимущественно в крупных локальных структурах субмеридионального простирания и контролируются зонами выклинивания прибрежно-морских отложений и зонами распространения русловых песчаников. Ключевые риски поиска и разведки залежей УВ связаны с наличием коллектора и локальной покрышки.

В верхнекаменноугольно-нижнепермских отложениях коллектор сложен преимущественно органогенными и доломитизированными известняками, реже доломитами. Емкостное пространство неоднородно – преобладают порово-каверно-трещинные коллекторы с развитой вторичной пористостью. Породы с наиболее высокими ФЕС сопряжены с областями интенсивной доломитизации и

выщелачивания с глубинами залегания до 2,0–2,5 км. Залежи УВ сосредоточены преимущественно в органогенных постройках, а также ожидается наличие одиночных органогенных построек, с массивными, сводовыми, литологически-экранированными залежами. Ключевые риски поиска и разведки залежей УВ связаны с наличием и качеством коллектора, покрышки, размерами структур.

Для нижнесилурийских отложений характерны коллекторы, представленные детрито-водорослевыми пачками, прослоями известняков и доломитов, со сложным строением емкостного пространства, как правило, порово-трещинного, реже каверно-порового и преобладанием трещинного с увеличением глубины. Пустотное пространство доломитов и доломитизированных известняков имеет вторичное происхождение: поры диагенетической доломитизации, каверны диагенетического и эпигенетического выщелачивания. ФЕС обусловлены фациальными особенностями бассейна седиментации. Залежи пространственно размещены на сводовых и склоновых участках крупных палеоподнятий. Ключевые риски поиска и разведки залежей УВ связаны с наличием и качеством коллектора, наличием покрышки.

С учетом проблематики исследуемых отложений, выполнено петрофизическое обоснование динамической интерпретации сейсмических данных для получения корректных результатов прогноза ФЕС. Анализ упругих характеристик пород в верхнепермских отложениях по данным одной скважины с ограниченным комплексом ГИС (упругие методы АК и ГГКп восстановлены по данным электрического и ядерного каротажа), свидетельствует об отсутствии контраста свойств между неколлектором и коллектором в поле акустического импеданса (рисунок 1а), а также внутри коллектора по характеру насыщения (рисунок 1б). Для второго продуктивного пласта-коллектора выявлена незначительная тенденция к повышению значений акустического импеданса для насыщенных песчаных разностей, что может быть использовано при дальнейшей интерпретации как дополнительный критерий на качественном уровне (рисунок 1в).

По результатам петроупругого моделирования на основе уравнений Гассмана дополнительно рассмотрены вероятные значения коэффициента пористости для коллекторов на площади. В качестве априорных значений использованы средние величины K_p для Харьягинского ($K_p=26\%$) и Лемьюского месторождений ($K_p=21\%$) – аналогов, разрабатываемых на суше (рисунок 1г). Установлено, что при наличии коллектора на изучаемой площади с пористостью 21%, отсутствует контраст с неколлектором в поле акустического импеданса. При значениях пористости порядка 26% отмечается минимальное отличие между коллектором и неколлектором в рамках данного параметра. Следовательно, в верхнепермских отложениях ожидаются потенциальные зоны распространения коллекторов с

предполагаемыми значениями пористости, которые не будут контрастно проявлены в поле упругих параметров (ошибка I рода).

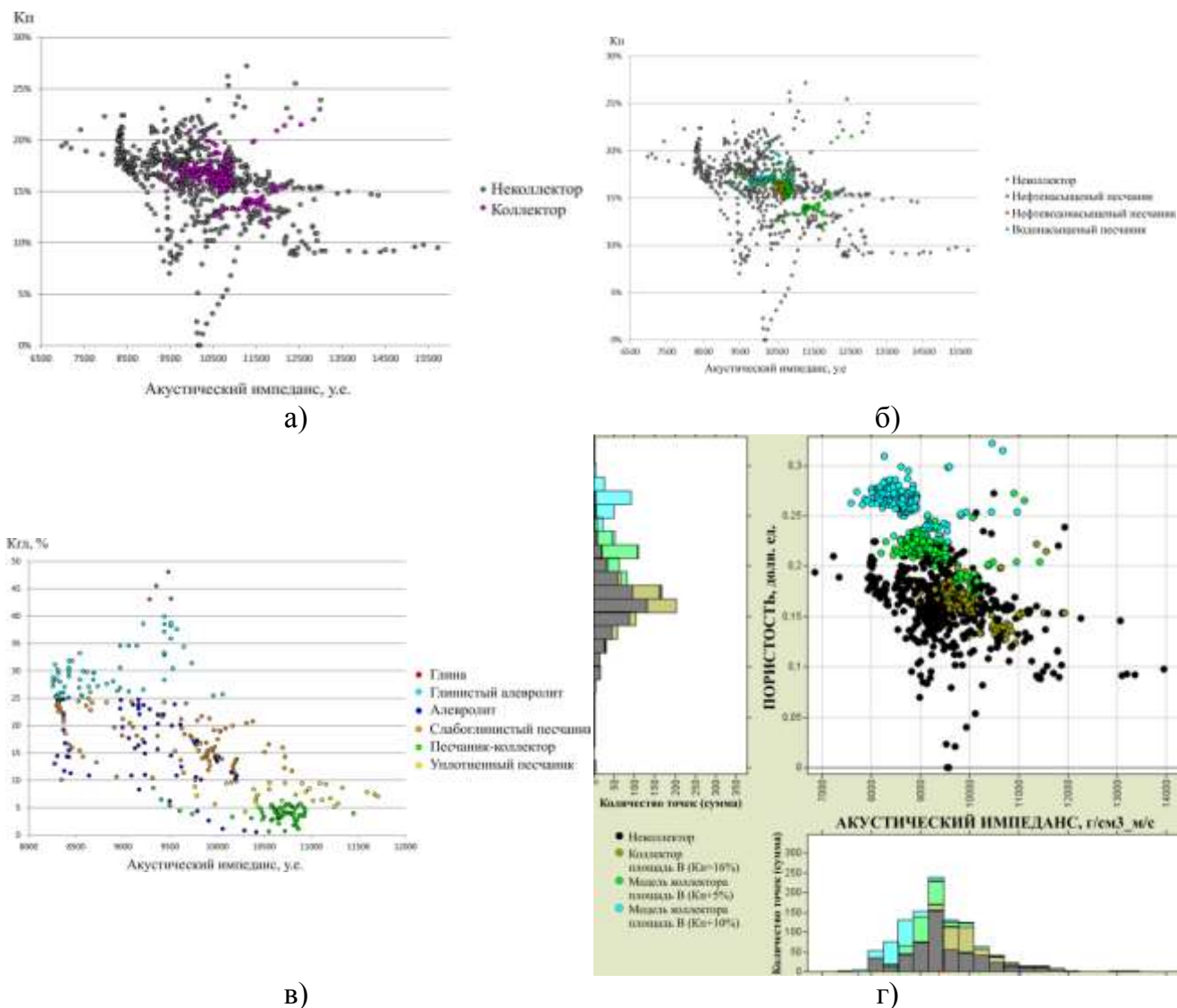


Рисунок 1 - Петрофизическое обоснование динамической интерпретации, выполненное для верхнепермских отложений по данным одной скважины с ограниченным комплексом ГИС:

- а) отсутствии контраста свойств между коллектором в поле акустического импеданса, б) отсутствии контраста свойств внутри коллектора по характеру насыщения, в) тенденции к повышению значений акустического импеданса для насыщенных песчаных разностей, г) петроупругое моделирование, демонстрирующее высокую вероятность ошибок I рода

Верхнекаменноугольно-нижнепермские карбонатные отложения характеризуются хаотичным распределением точек коллектора и неколлектора по параметру акустического импеданса, что подтверждает отсутствие возможности использования стандартных интерпретационных подходов для прогноза зон распространения коллектора и их ФЕС. Нижнесилурийские карбонатные отложения неохарактеризованы упругими методами ГИС.

Подготовленное петрофизическое обоснование динамической интерпретации

сейсмических данных демонстрирует целесообразность восстановления акустического импеданса только в интервале верхнепермских отложений с целью анализа на качественном уровне. Корректная количественная интерпретация невозможна с использованием текущего набора входных данных и требует привлечения дополнительной геологической информации.

Поэтому, на первом этапе выполнена качественная интерпретация с использованием подхода, наименее требовательного к наличию скважинной информации - анализа сейсмических атрибутов. Методика поиска перспективных объектов на основе анализа амплитудно-частотных характеристик сейсмической записи включала в себя приемы по повышению надежности результатов:

- сокращение размерности массива используемых атрибутов по некоррелируемости их физической природы;
- анализ комплексных карт физических и геометрических атрибутов волнового поля, представляющих интегральную характеристику отражения;
- учет тектонических особенностей строения участка в процессе динамической интерпретации (анализ в области единого тектонического блока).

В результате по комплексу сейсмических атрибутов и априорной геологической информации удалось выявить и проследить на площади перспективные геологические объекты (Рисунок 2), для которых дополнительно обобщена и проанализирована геолого-геофизическая информация по разрабатываемым месторождениям аналогам на суше ТП НПП (преимущественно месторождения НАО, прилегающие к акватории Печорского моря).

В верхнепермских отложениях выявлена система палеорусел субмеридионального направления, осложненная меандрами и дельтой бокового прорыва (рисунок 2а, 2б). Как правило, перспективы открытия новых ловушек УВ приурочены к русловым и дельтовым фациям, в частности прирусловых отмелей.

Отложения представлены плохо отсортированными песчаниками с довольно высоким содержанием обломков и закономерным распределением по разрезу зернистости - от грубозернистых внизу - до тонкозернистых вверху с частичным или полным повторением последовательности в напластовании.

Изучаемые площади расположены в зоне низменных и надприливных палеоравнин, с ожиданием доли коллекторов в разрезе до 45%, что подтверждено на представленных картах сейсмических атрибутов.

При испытании верхнепермских отложений получен приток нефти дебитом $Q_n=48$ м³/сут, который может быть обоснован вскрытием скважиной В-1 меандра, заполненного преимущественно песчаным материалом. В скважине А-1, не вскрывшей перспективные геологические объекты, был получен непромышленный приток нефти с фильтратом бурового раствора дебитом $Q_n=1,31$ м³/сут

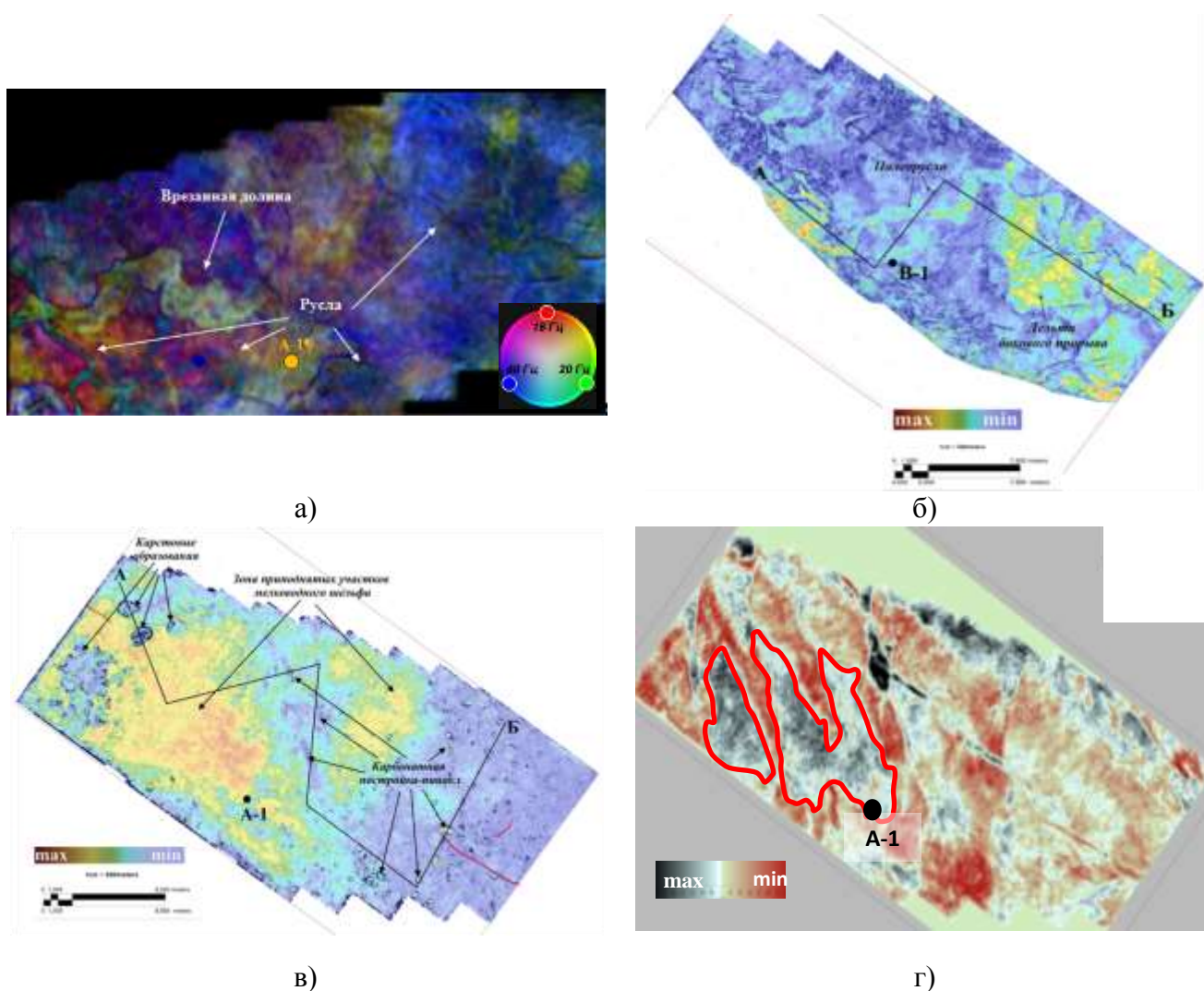


Рисунок 2 – Карта атрибута а) спектральной декомпозиции в интервале кровли верхнепермских отложений (площадь А); б) RMS-амплитуды в интервале верхнепермского пласта коллектора (площадь В); в) комплексного атрибута RMS-амплитуды и когерентности в нижнепермском интервале разреза (площадь А); г) горизонтального среза амплитуд в нижнесилурийском интервале разреза (площадь А)

Коллекторы верхнепермских отложений на месторождениях-аналогах (Возейское, Харьягинское и др.) характеризуются как среднеёмкие со средними значениями пористости порядка 20%, проницаемости – 200 мД, нефтегазонасыщенности – 60%. Данные величины близки к оцениваемым по результатам РИГИС в скважине В-1, что, в целом, может являться характеристикой выделенных объектов, интерпретируемых как заполненные преимущественно песчаным материалом палеорусла, и обладающих повышенными ФЕС пород-коллекторов.

При анализе среднеквадратичных амплитуд волнового поля в интервале верхнекаменноугольных верхнепермских отложений выделена приподнятая зона палеошельфа, расчлененная карстовыми образованиями, и погруженная, содержащая множество карбонатных построек «пинакл» (рисунок 2в).

Считается, что формирование тел биогермных известняков связано с отмельными участками палеоподнятий. На стадии седиментогенеза их пустотное пространство формировалось под активным воздействием вод по первичным каналам и пустотам. Обломочные карбонатные тела мелководного шельфа также изначально обладали высокой емкостью, поскольку их формирование происходило в обстановках мелководья с высокой гидродинамической активностью. В то время как шельфовые тела мелко-тонкозернистых и зернисто-детритовых (иловых) известняков не обладали высокой первичной емкостью в связи с их седиментационными особенностями. Вместе с тем, мелкодетритовые, изначально слабо пористые осадки могли накапливаться в пониженных участках мелководья и на более значительных глубинах шельфа, ниже иловой линии. Наличие иловой составляющей отрицательно влияло на формирование емкостных свойств этих пород.

Следовательно, результаты интерпретации МОГТ-3D на площади А подтверждаются региональными представлениями о формировании перспективных зон распространения коллектора. На площади В по результатам исследований уточнены контуры антиклинальной структуры, в куполе которой скважиной В-1 был получен приток газа дебитом $Q_r=680$ тыс. м³/сут.

Выявленные коллекторы верхнекаменноугольно-нижнепермских отложений на месторождениях-аналогах (Сандивейское, Варандейское, Сарутаюсское и др.) характеризуются как средне - и высокеемкие со средними значениями пористости порядка 15% и проницаемости порядка 180 мД. Среднее значение коэффициента нефтегазонасыщенности составляет 75%. Средние значения ФЕС пород-коллекторов по рассматриваемым НГО близки к оцениваемым по результатам РИГИС в скважинах А-1 (Хорейверская НГО) и В-1 (Варандей-Адзвинская НГО), что может являться характеристикой выделенных объектов, представленных преимущественно органогенными и органогенно-детритовыми известняками, местами окремнелыми, плотными, доломитизированными (скв. А-1). Зоны несколько улучшенных ФЕС (увеличение пористости и проницаемости могут быть сопряжены с органогенными постройками и приподнятой зоной шельфа).

Также по результатам интерпретации сейсмических данных выделены массивные карбонатные постройки в нижнесилурийских отложениях (рисунок 2г). Они были сформированы предположительно в верхней части сублиторальной области, фации которой наиболее широко развиты в Хорейверской НГО от ордовика до раннего девона. Одной из особенностей данных отложений является их интенсивная сплошная доломитизация на стадии раннего диагенеза. Выявленные карбонатные постройки в зоне верхней сублиторали представлены преимущественно биостромами и биогермами. Они содержат биогермные

кораллово-строматопоровые (вторичные) доломиты и известняки. Данные постройки широко развиты на склонах крупных палеоподнятий, в частности, Большеземельского свода.

Выявленные карбонатные постройки на площади А частично вскрыты скважиной А-1 (скв. расположена на границе исследуемого объекта). Получен непромышленный приток нефти $Q_n=0,275$ м³/сут, что может быть объяснено неоптимальным гипсометрическим положением скважины вне «гребня» карбонатной постройки.

Коллекторы нижнесилурийских отложений по данным месторождений-аналогов (группа Хатаяхских месторождений, Западно-Возейшорское, Западно-Командиршорское-II и др.) характеризуются как среднеемкие со средними значениями пористости порядка 11% и проницаемости порядка 150 мД. Среднее значение коэффициента нефтегазонасыщенности составляет 85%. Данные величины приняты в качестве прогнозных значений ФЕС выделенной карбонатной постройки при условии оптимального заложения скважины.

Таким образом, обосновано наличие выявленных объектов на шельфе, поскольку аналогичные геологические тела являются ловушками УВ и вскрыты скважинами на суше ТП НГП. Проведена статистическая оценка средних значений параметров ФЕС по данным месторождений ТП НГП и выполнен их прогноз в соответствии с усредненными характеристиками по данным обобщения геологической информации. Выполненное исследование минимизировало риски поискового бурения и дальнейших ГРП за счет повышения качества и достоверности полученных результатов. Дальнейшая оценка ресурсов и оптимизация плана ГРП позволят дополнительно оценить повышение экономической привлекательности данных площадей и других шельфовых объектов компаниями - недропользователями.

В третьей главе изучается возможность использования результатов качественной интерпретации спектральной декомпозиции волнового поля в качестве входных данных при выполнении независимого количественного прогноза эффективных толщин. Объект исследования представлен сложнопостроенным коллектором ачимовских отложений одного из участков Западно-Сибирской НГП. Данные отложения характеризуются сложным геологическим строением пластов, их вертикальной и латеральной неоднородностью, относительно низкими ФЕС коллекторов.

Для независимой оценки эффективных толщин разработана методика прогноза на основе данных трех частотных диапазонов спектральной декомпозиции волнового поля. Предпосылкой для использования и дальнейшего совершенствования данной методики является чувствительность амплитудно-

частотных характеристик сигнала в полосе спектра к изменению мощности акустически контрастного пласта. С целью изучения влияния мощности песчаного пласта-коллектора на параметры волнового поля созданы три синтетические модели «клина» в диапазоне низких, средних и высоких частот (рисунок 3).

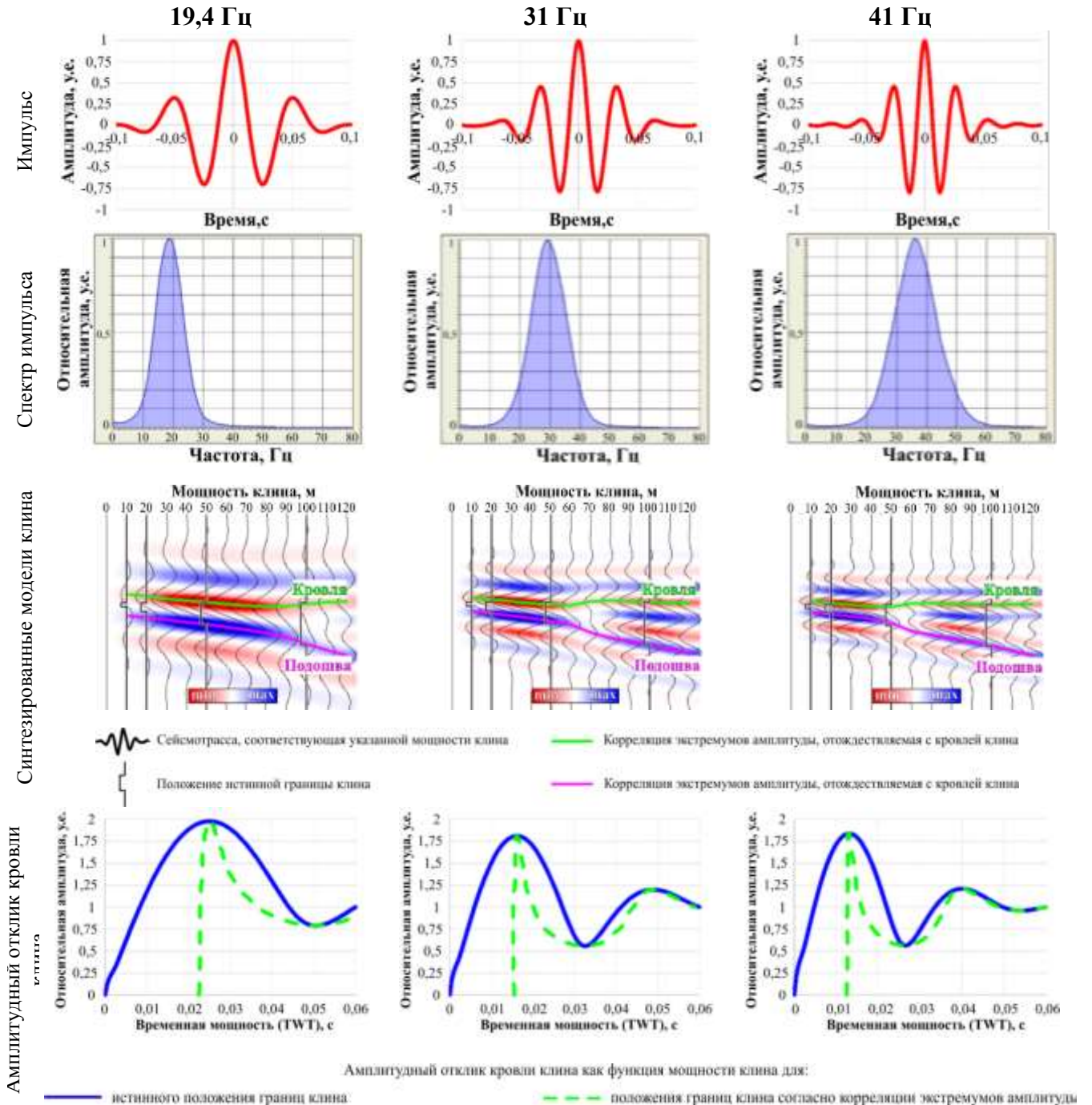


Рисунок 3 - Сравнительная оценка результатов сейсмогеологического моделирования с использованием анализируемых частот спектральной декомпозиции

В качестве упругих свойств песчаника (коллектор) и вмещающих пород использованы модальные значения акустического импеданса по данным ГИС.

На синтетических моделях изучен амплитудный отклик от кровли песчаного

пласта-коллектора. Наблюдаемые экстремумы конструктивной и деструктивной интерференции, определяют характер распределения амплитуды в узкой полосе частот в зависимости от мощности пласта, и демонстрируют неоднозначность решения обратной задачи, поскольку одному значению амплитуды соответствует несколько значений толщин песчаника. Поэтому первоначально использована низкочастотная модель, имеющая фактически единственный максимум конструктивной интерференции, что в совокупности с геологической информацией минимизирует неоднозначность прогноза.

Далее итеративно вовлечены в интерпретацию модели по увеличению их частотного состава с анализом амплитудного отклика, не превышающего по своей величине первого максимума интерференции. Полученные модели проинтерпретированы с помощью стандартных методов структурной интерпретации, а также на основе решения обратной задачи с целью восстановления мощности песчаного пласта-коллектора. Расхождение истинных значений толщин и определенных стандартным способом на примере интерпретации низкочастотной модели (19,4 Гц) достигает 22,5 мс (порядка 48 м при модальном значении скорости 4200 м/с), в то время как для совершенствованного подхода на основе результатов спектральной декомпозиции – 1,9 мс (порядка 4 м при модальном значении скорости 4200 м/с).

Дальнейшее пропорциональное смешивание результирующих карт прогноза трех частотных составляющих волнового поля позволяет уверенно восстановить значения толщин песчаного пласта-коллектора (рисунок 4-5).

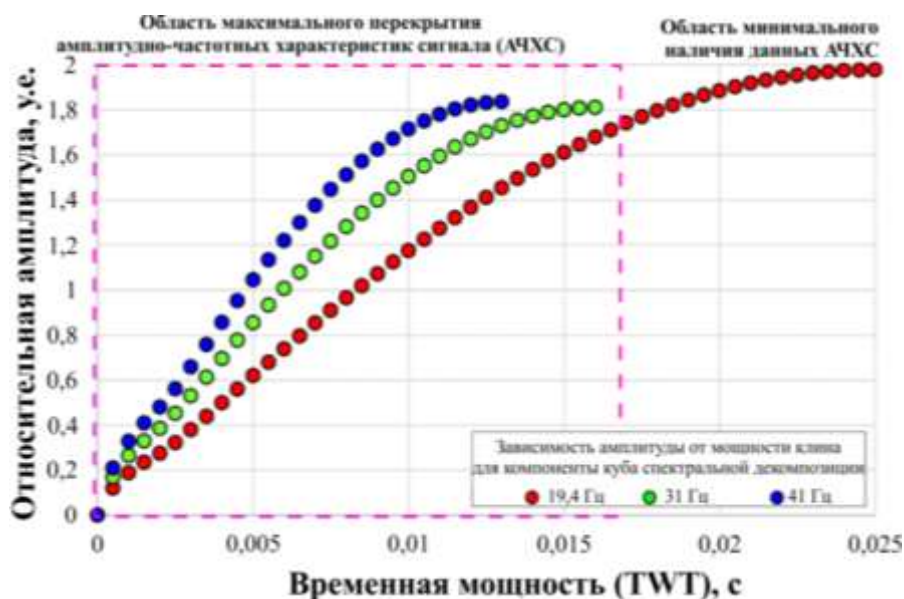


Рисунок 4 - Анализ индивидуального вклада амплитудно-частотных характеристик сигнала при определении мощности синтетической модели клина

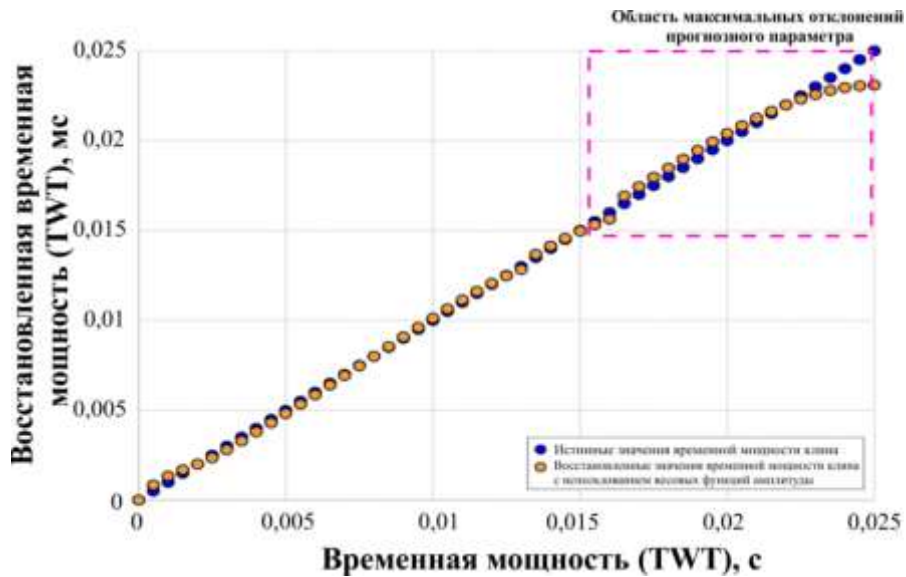


Рисунок 5 - Расчет эффективной мощности синтетической модели клина с использованием массива анализируемых компонент

Применение усовершенствованной методики прогноза эффективных толщин на полевых материалах продемонстрировало повышенные значения в проксимальной части конуса выноса, а также более низкие значения в дистальной части, подводящем канале и небольших эрозионных врезях.

Достоверность прогноза эффективных толщин представлена как стандартное отклонение от скважинных данных, величина которого составила порядка 4,7 м (таблица 1).

Таблица 1 – Сопоставление прогнозных эффективных толщин с данными бурения

Скважина	Эффективная толщина, м (бурение)	Акустическая инверсия		Спектральная декомпозиция	
		Эффективная толщина, м (прогноз)	Отклонение от результатов бурения, м	Эффективная толщина, м (прогноз)	Отклонение от результатов бурения, м
9	24,5	24,47	0,03	19,85	4,65
12	28,1	20,92	7,18	21,33	6,77
14	21,1	24,07	-2,97	21,93	-0,83
16	6,7	4,76	1,94	7,78	-1,08
17	0	5,57	-5,57	4,64	-4,64
19	0	-5,06*	5,06	2,75	-2,75
25	0	5,67	-5,67	6,14	-6,14
Стандартное отклонение, м		5,1		4,7	

* повышенные значения акустического импеданса в скважине №19 приводят к отрицательным значениям эффективной мощности согласно уравнению регрессии

Представленный результат сравним с прогнозной картой эффективных толщин по данным акустической инверсии, где их стандартное отклонение составило 5,1 м (рисунок 6). Таким образом, представленная методика рекомендована для независимой оценки эффективных толщин и может быть использована как самостоятельно, так и в комплексе с существующими подходами.

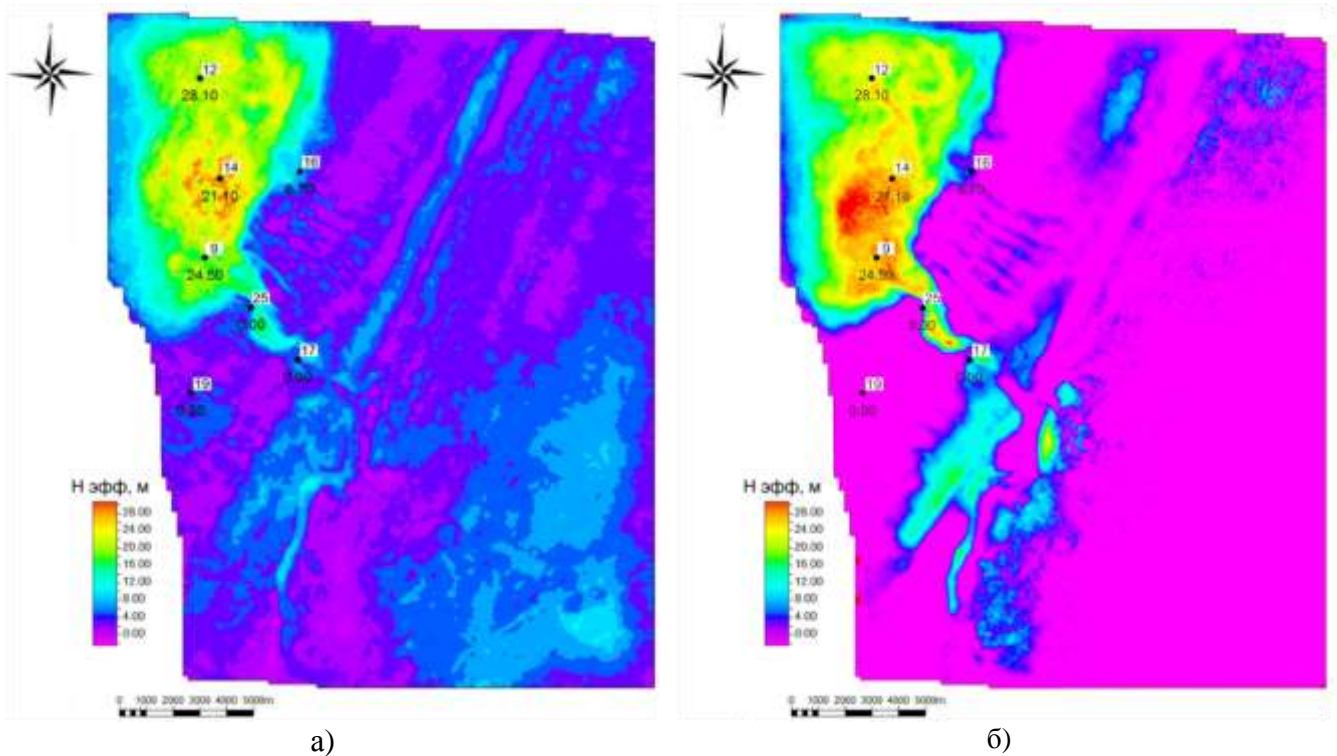


Рисунок 6 – Результаты количественного прогноза эффективных толщин (без подсадки на скважины) по данным а) спектральной декомпозиции, б) инверсионных преобразований

В четвертой главе исследована возможность расширения анализируемых упругих свойств горных пород как способа повышения достоверности прогноза ФЕС в межскважинном пространстве. Ввиду ограниченного набора упругих методов ГИС (АК, ГГКп) в скважинах, вскрывших ачимовские отложения, для подготовки петрофизического обоснования интерпретации доступны: плотность, скорость продольной волны, акустический импеданс (рисунок 7а-в). Для последних параметров, граница между зонами коллектора и неколлектора выделяется, но с существенным перекрытием областей.

Наиболее выраженная картина наблюдается по плотностной характеристике пород, однако при выполнении инверсионных преобразований данный параметр в большинстве случаев не восстанавливается с необходимой точностью для прогноза ФЕС. Расширение упругих методов ГИС с целью синтеза интервального времени пробега поперечной волны требует применения подхода петроупругого моделирования с привлечением геологической информации по разрабатываемым месторождениям-аналогам. Для корректного расчета объемного содержания

глинистой компоненты использованы зависимости Уренгойского НГКМ. В качестве линии тренда (контроль качества) для синтезированных значений скорости поперечной волны использованы зависимости по данным ГИС Уренгойского НГКМ и Заполярного ГКМ.

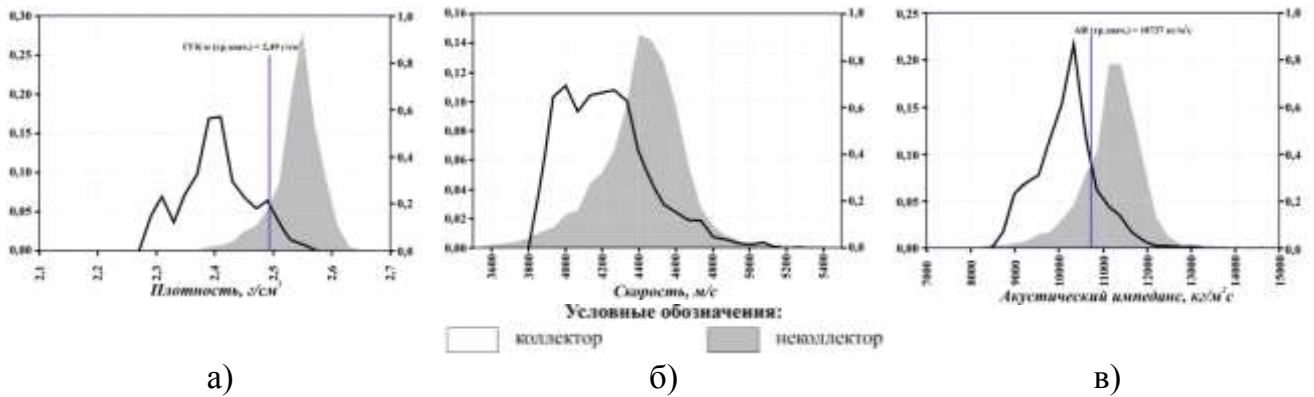


Рисунок 7 - Разделение зон коллектора и неколлектора по гистограммам исходных данных ГИС: а) плотность, б) скорость продольной волны, в) акустический импеданс

Наиболее оптимальной является модель Xu-White, поскольку удовлетворяет условию минимального отклонения синтезированных значений от линии тренда для коллектора по параметру V_p/V_s . Тем самым появляется возможность расчета акустического и сдвигового импеданса и их производных, которые наиболее чувствительны к изменению литологического состава пород и характера насыщения коллектора (рисунок 8).

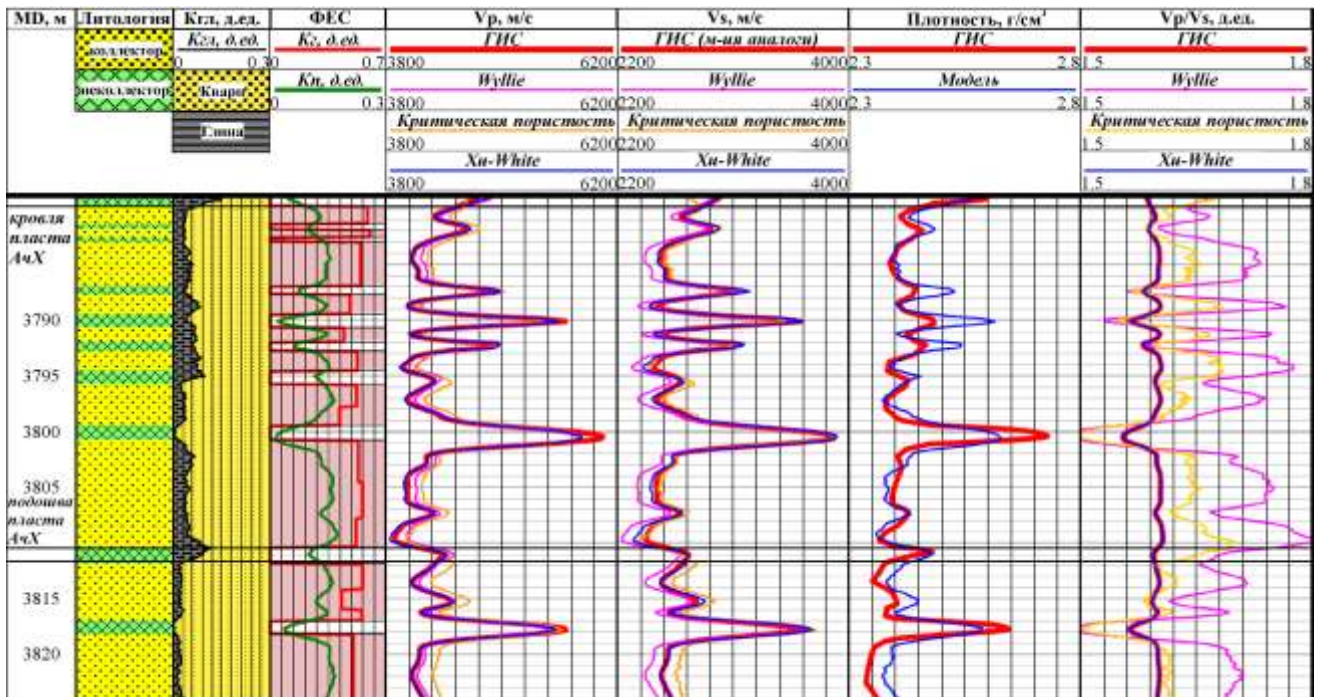


Рисунок 8 - Пример планшета, демонстрирующего сопоставление созданных упругих моделей среды в интервале ачимовской толщи (скважина №9)

Наибольший отклик на незначительные изменения входных среди некоррелируемых пар упругих параметров (акустический импеданс – сдвиговый импеданс, акустический импеданс – V_p/V_s и др.) демонстрируют атрибуты Ламе. На кросс-плоте атрибутов Ламе для продуктивного пласта ачимовской толщи удастся уверенно отделить зону коллектора и неколлектора с минимальной областью неоднозначности, а также разделить коллектор по характеру насыщения газ-вода (рисунок 9). С использованием только данных акустического импеданса подобное интерпретационное решение представляется затруднительным.

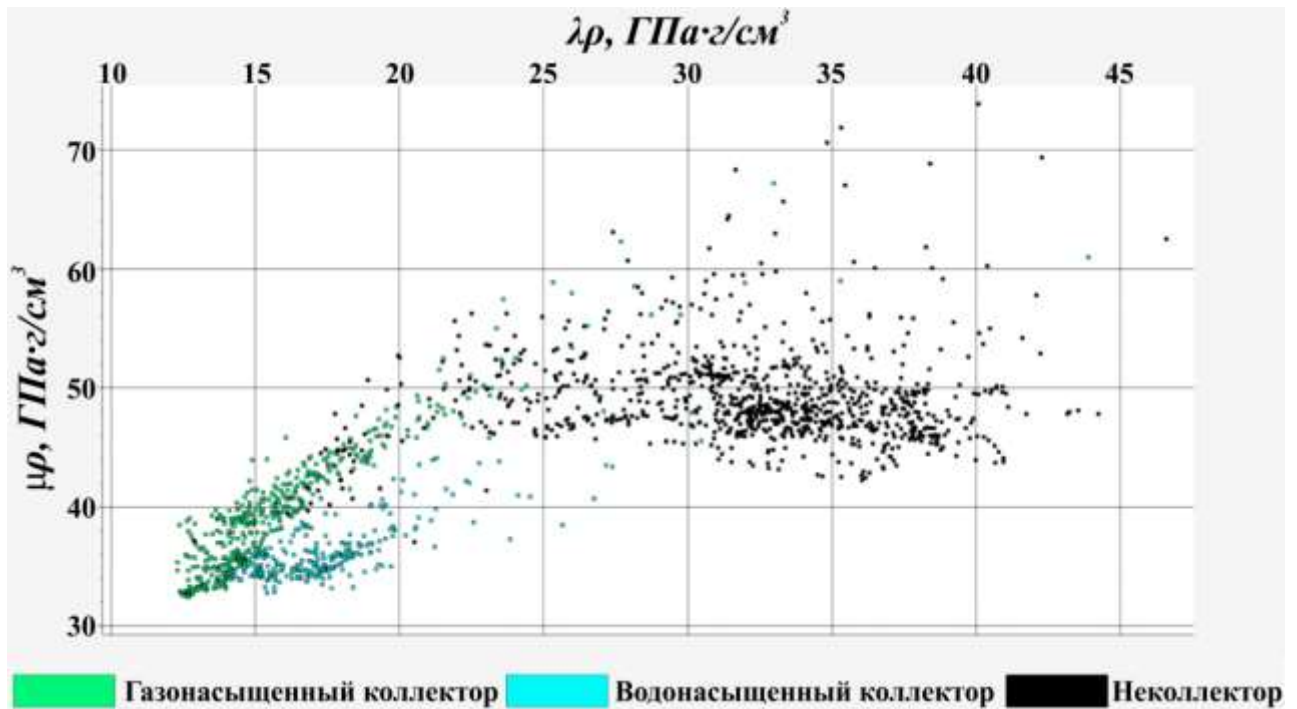
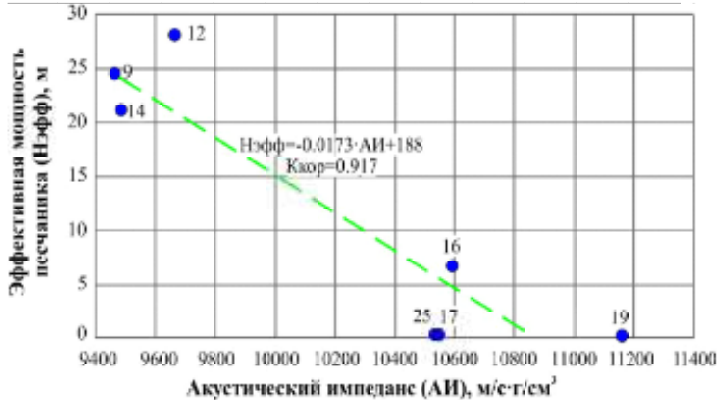


Рисунок 9 - Уменьшение неоднозначности решения обратной задачи с использованием синтетической кривой скорости поперечной волны на примере кросс-плота атрибутов Ламе

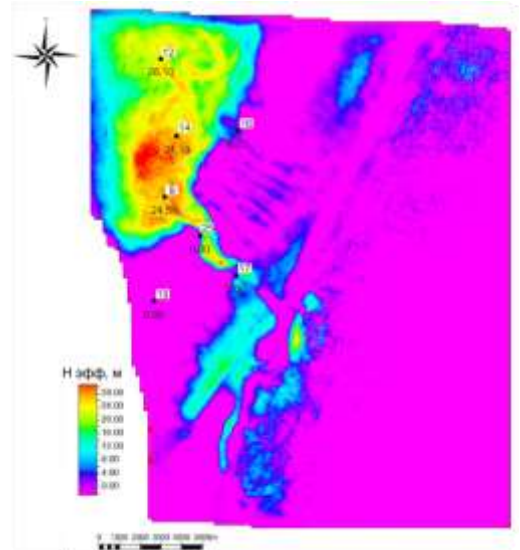
Синтезированные данные были использованы при расчете синхронной инверсии и кубов атрибутов Ламе. Выявлены кросскорреляционные зависимости с $K_{кор}$ от 0,7 д.ед. (рисунок 10), что позволило выполнить прогноз коэффициента пористости и газонасыщенности в межскважинном пространстве.

По данным прогноза зоной улучшенных ФЕС являются проксимальная часть конуса выноса и устье подводящего канала, что не противоречит геолого-геофизической информации о закономерностях строения отложений ачимовской толщи.

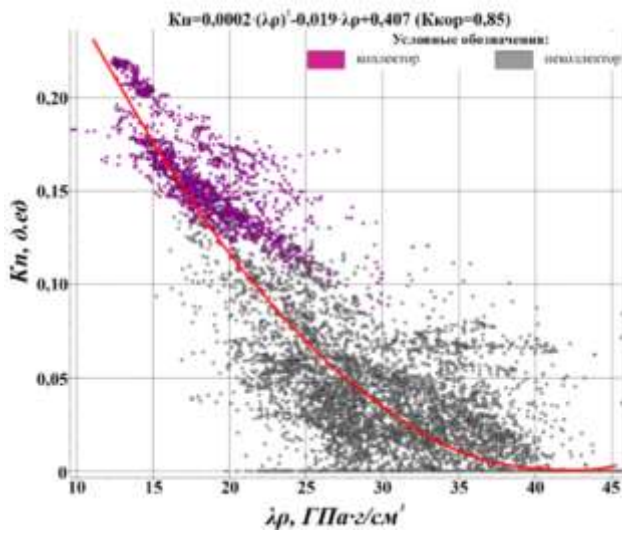
Таким образом, петроупругое моделирование как инструмент расширения комплекса ГИС, характеризующего упругие свойства среды, позволяет увеличить набор и качество анализируемых данных. Это значительно повышает достоверность прогноза ФЕС коллекторов со сложным строением и расположения их зоны глинизации.



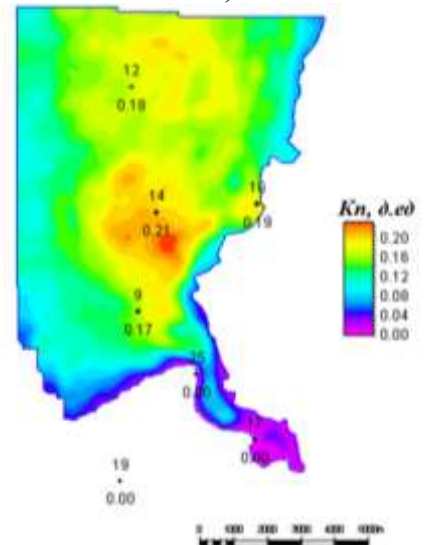
а)



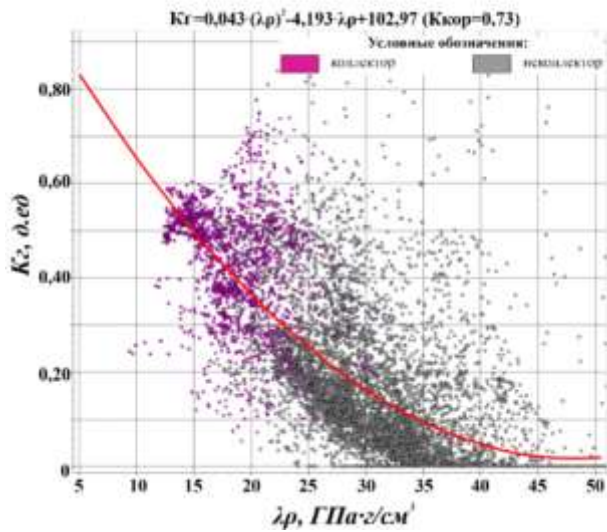
б)



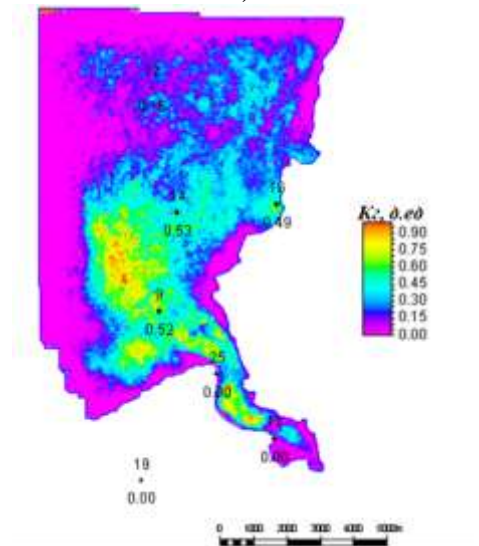
в)



г)



д)



е)

Рисунок 10 – Примеры выполнения прогноза эффективной мощности (а,б), коэффициента пористости (в,г) и коэффициента газонасыщенности (д,е) для пласта АчХ

Заключение:

1. В рамках выполненной работы рассмотрены основные проблемы выделения перспективных геологических объектов со сложным строением и прогноза их свойств на основе динамической интерпретации сейсмических данных для малоизученных бурением площадей.

2. В данном исследовании предложен усовершенствованный подход к выделению геологических тел – потенциальных ловушек УВ и прогнозу их ФЕС. Комплексный подход к анализу атрибутов волнового поля позволил детализировать геологическое строение продуктивных отложений в акватории Печорского моря. Дополнительная геологическая информация по разрабатываемым месторождениям-аналогам на суше ТП НПП позволила спрогнозировать ФЕС исследуемых отложений в условиях отсутствия данных глубокого бурения и кондиционных материалов ГИС. Выявлены структурные и структурно-литологические ловушки и выполнен прогноз ФЕС:

- верхнепермские терригенные отложения: русла, осложненные меандрами и дельтой бокового прорыва. Продуктивность отложений подтверждена скважиной В-1, где получен дебит нефти объемом $48 \text{ м}^3/\text{сут}$;

- верхнекаменноугольно-нижнепермские карбонатные отложения: антиклинальная структура на площади В, продуктивность доказана результатами опробования скважины: $Q_r=680 \text{ тыс. м}^3/\text{сут.}$; приподнятые зоны мелководного шельфа с палеокарстовыми образованиями (зоны выщелачивания, предполагается улучшение ФЕС) и погруженные зоны шельфа, содержащие одиночные карбонатные постройки типа «пинакл»;

- массивные карбонатные постройки в нижнесилурийских отложениях, частично вскрытые скважиной А-1 (скважина расположена на границе исследуемого объекта). Получен непромышленный приток нефти $Q_n=0,275 \text{ м}^3/\text{сут}$, что может быть объяснено неоптимальным гипсометрическим положением скважины вне «гребня» карбонатной постройки.

3. Выполнена адаптация метода спектральной декомпозиции волнового поля для изучения сложнопостроенных коллекторов ачимовской толщи. Результаты, используемые на качественном уровне при геолого-геофизической интерпретации данных, послужили входными данными при выполнении количественного прогноза эффективных толщин. Решение прямой задачи позволило проанализировать изменения отклика амплитуд в трех частотных диапазонах в зависимости от мощности песчаных отложений. Восстановление толщин с использованием данного подхода имеет более высокую достоверность их

определения в сравнении со стандартными интерпретационными методиками (корреляция ОГ кровли-подошвы коллектора). Качество прогноза эффективных толщин количественно сравнимо с аналогичными результатами по данным акустической инверсии.

4. Расширен набор упругих методов ГИС с применением петроупругого моделирования, с восстановлением скорости поперечной волны. Рассчитанные атрибуты Ламе, как производные акустического и сдвигового импедансов, позволили более уверенно провести границу между коллектором и неколлектором, а также разделить коллектор по характеру насыщения. Результаты синхронной инверсии послужили основой для прогноза ФЕС в ачимовских отложениях в межскважинном пространстве. Новые данные об упругих свойствах породы имеют высокую степень корреляции с коэффициентом пористости и газонасыщенности коллектора.

5. Результаты выполненной работы открывают новые перспективы поиска и дальнейших ГРП на малоизученных бурением площадях, в том числе при изучении сложнопостроенных коллекторов методами динамического анализа.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

Статьи в ведущих журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, утвержденный ВАК Минобрнауки России и входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования:

1. Волков Д.С. Возможности количественной интерпретации результатов спектральной декомпозиции сейсмических данных МОГТ-3D. // Актуальные проблемы нефти и газа. 2022. Вып. 1(36). С. 25–41. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2022-36.art2>.

2. Демченко Н.П., Ростовщиков В.Б., Колоколова И.И., Маракова И.А., Волков Д.С. Новые технологии прогноза и поисков залежей углеводородов с целью повышения эффективности геологоразведочных работ в Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции. // Горные науки и технологии. 2022;7(4):274–286. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-04-07>. Журнал, входит в международную реферативную базу данных – Scopus.

3. Волков Д.С. Возможности и ограничения динамического анализа сейсмических данных при выполнении картирования зон глинизации и прогноза фильтрационно-емкостных свойств на примере конуса выноса ачимовской толщи. // Научно-технический сборник Вести газовой науки. 2023. № 1 (53). С. 350-359. Журнал, входит в категорию K1.

Публикации в других изданиях

4. Ростовщиков В.Б., Колоколова И.В., Сбитнева Я.С., Волков Д.С. Перспективы освоения трудноизвлекаемых запасов нефти в арктической зоне Тимано-Печорской провинции. // Инженер-нефтяник. 2022. № 2. С. 7-14.

В сборниках докладов и тезисов докладов на конференции:

5. From qualitative interpretation to quantitative analysis: prediction of properties of geological bodies by using the spectral decomposition attribute - case study of Achimov turbidity system in West-Siberia. // Сборник: Society of Petroleum Engineers – SPE Russian Petroleum Technology Conference 2020, RPTC 2020.

6. Адаптация методов динамического анализа сейсмических данных к прогнозу ФЕС сложнопостроенных коллекторов на малоизученных бурением площадях Арктической зоны РФ. // Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность. Тезисы докладов. XI Молодежная международная научно-практическая конференция. Москва, 2023. С. 7.

7. Разработка методических подходов при изучении сложнопостроенных природных резервуаров на основе петроупругого моделирования, динамического анализа сейсмических данных и алгоритмов машинного обучения. // Новые технологии в газовой промышленности: газ, нефть, энергетика. XIV Всероссийская конференция молодых ученых, специалистов и студентов: тезисы докладов. Москва, 2022. С. 30-31

8. Возможности применения результатов динамического анализа материалов МОГТ-3D при прогнозе зон распространения коллекторов на малоизученных бурением площадях. // Рассохинские чтения: материалы конференции / под редакцией Р. В. Агиней. – Ухта: УГТУ, 2022. С 28-31

Прочие публикации:

9. Пылев Е.А., Пинчук А.В., Поляков Е.Е., Чурикова И.В., Ромащенко С.Ю., Волков Д.С., Творогов М.А., Гачегова Н.Д. Комплексная технология построения прогнозных сейсмофациальных и геологических моделей с использованием нейронных сетей для распознавания коллекторов венда в разрезе для оптимизации эксплуатационного бурения при разработке Чаяндинского месторождения. // Научно-технический сборник Вести газовой науки. 2023. № 1 (53). С. 182-205.

10. Волков Д.С. Возможности и ограничения динамического анализа сейсмических данных на этапе поисков и прогноза высокочемких коллекторов и детализации структурно-тектонической модели на примере площади в Тимано-Печорском нефтегазоносном бассейне. // Актуальные проблемы нефти и газа. Сборник трудов V Всероссийской молодежной научной конференции. Москва, 2022. С. 301-304.

Подписано к печати «__» _____ 2024 г.

Заказ №

Тираж 100 экз.

1 уч. – изд.л., ф-т 60x84/16

Отпечатано в ООО «Газпром ВНИИГАЗ»

По адресу: 142717, Московская область,
г.о. Ленинский, п. Развилка, улица Газовиков,

здание 15, строение 1,

ООО «Газпром ВНИИГАЗ»