

На правах рукописи

минусин

Амани Мангуа Марк Марсьяль

ВОЗМОЖНОСТИ СЕЙСМИЧЕСКИХ АТРИБУТОВ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
И ИЗУЧЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ТРЕЩИНОВАТЫХ КОЛЛЕКТОРОВ
НА ПРИМЕРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Специальность:

25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

г. Томск, 2021г.

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Научный руководитель:

Орехов Александр Николаевич, кандидат геолого-минералогических наук, директор общества с ограниченной ответственностью «Гео Сервис» (ООО «ГЕОСЕРВИС»).

Официальные оппоненты:

Приезжев Иван Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры разведочной геофизики и компьютерных систем Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина» (ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина»).

Митрофанов Георгий Михайлович, доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН).

Ведущая организация:

Общество с ограниченной ответственностью «ГЕОЛАБ» (ООО «ГЕОЛАБ»).

Защита состоится «24» февраля 2022 г. в 13 часов 00 мин. Совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 999.234.02 при Российском государственном геологоразведочном университете имени Серго Орджоникидзе по адресу: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23, зал диссертационного совета (каб. 5-17).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» (г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23) и на сайте: https://mgri.ru/science/scientific-and-innovative-activity/dissertation-council/download/Dissertation_Amani%20Mangua.pdf

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направить ученому секретарю диссертационного совета по указанному выше адресу.

Автореферат разослан «___» _____ 202_ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат геолого-минералогических наук



Иванов А.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Большинство доказанных запасов нефти и газа в мире находятся в разрабатываемых месторождениях. В России в таких месторождениях содержится 77 % доказанных запасов. При этом все эти месторождения характеризуются высокой степенью выработанности. В то же время потребность в углеводородах в мире растёт с каждым годом. Новые месторождения чаще всего характеризуются сложными геологическими условиями поиска, разведки и добычи; наличием нетрадиционных запасов углеводородов, например, в *трещиноватых коллекторах*, примеры залежей нефти в которых достаточно широко и наглядно описаны в мировой литературе. *Говоря о трещиноватости в юрском интервале в нашем случае (терригенные разрезы в условиях Западной Сибири), стоит отметить, что речь идёт о естественных трещинах, вызванных посттуронскими тектоническими нарушениями, что связано с горизонтальными подвижками в фундаменте.*

Пространственное изучение трещиноватости в связи с соответствующими коллекторами возможно наземными геофизическими методами. На сегодняшний день основное направление такого рода работ связывается, главным образом, с *сейсморазведкой*, которая рассматривается как единственный наземный метод, предполагающий возможность трёхмерного картирования геологической среды с достаточно высоким (относительно изучаемых объектов) разрешением. Для обеспечения возможностей решения подобных задач при комплексном исследовании объектов всё чаще требуется использование *сейсмических атрибутов*, расчёт и анализ которых сегодня являются неотъемлемой частью технологии интерпретации сейсморазведочных данных. Их использование существенно расширяет информативность метода, позволяя получать информацию, недоступную при других подходах.

Объект и предмет исследования. Объектом и предметом исследования являются сейсмические атрибуты и их применение для изучения трещинно-кавернозных коллекторов в условиях Западной Сибири, а также характеристика взаимосвязи сейсмических атрибутов с элементами геологической среды.

Цель настоящей диссертации – оценка возможности применения сейсмических атрибутов для выявления и изучения латеральных и вертикальных изменений геологической среды и создание методики выбора информативности сейсмических атрибутов для прогноза ФЕС коллекторов, а также для оценки напряжённых состояний коллекторов трещин кавернозных типов по площади в межскважинном пространстве.

В диссертационной работе решены следующие **научные задачи**:

1. На основе обобщения результатов анализа сейсмических атрибутов, рассчитанных при интерпретации пространственно-площадных 3D МОГТ в пределах площади исследования, изучены факторы, определяющие характер объёмного распределения трещиноватости геологической среды. Предложена методика оперативной оценки распространения зон повышения трещиноватости коллекторов, в основе которой лежит анализ геометрических атрибутов.
2. Обоснована возможность решения инженерно-геологических задач на основе канонического анализа сейсмических атрибутов, существенно повышающая достоверность получаемых результатов. Разработана методика выбора набора сейсмических атрибутов при прогнозировании трещиноватых коллекторов.
3. На основе сейсмических атрибутов и геолого-геофизических данных (ГИС, ГДИС) предложены методики площадного прогноза аномальных пластовых давлений. Разработанная методика апробирована на фактических данных.
4. Приведены практические примеры с результатами применения полученных закономерностей на реальных геологических объектах.

Методы исследования

1. Актуалистический подход к анализу сейсмических атрибутов и их комплексирование для выделения зон повышения трещин.

2. Применение комплексирования сейсмических атрибутов в сейсмической интерпретации с использованием математических методов в геологии (интеллектуальном анализе данных в нефтегазовой отрасли) для оценки информативности сейсмических атрибутов при прогнозе ФЕС трещиноватых коллекторов.

3. Экспериментальная проверка прогностических данных с помощью сопоставления прогнозирования зон повышения трещин коллекторов и данных по скважинам.

Фактический материал. Диссертационное исследование базируется на реальных геолого-геофизических данных. В процессе выполнения работы были использованы акты испытания скважин, материалы геофизических исследований скважин (ГИС), сейсморазведочные данные МОГТ 2D и 3D по некоторым месторождениям углеводородов Томской и Тюменской областей.

Положения, выносимые на защиту

1. Сейсмические атрибуты, зоны повышенной трещиноватости и напряженных состояний коллекторов трещинно-кавернозных типов взаимосвязаны между собой. Анализ сейсмических атрибутов позволил построить априорные модели трещиноватости пород верхнеюрских отложений, изучить состояние трещиноватых коллекторов.

2. Канонический анализ является альтернативным подходом и позволяет выбрать информативные сейсмические атрибуты для прогноза ФЕС трещиноватых пластов-коллекторов. При использовании выбранных таким образом сейсмических атрибутов был спрогнозирован ФЕС трещиноватых пластов-коллекторов в пространстве между скважинами.

3. Форма отражённой волны, извлечённая из сейсмической записи, несёт в себе интегральную характеристику геологической среды. Соответственно, изучение изменения формы волны по вертикали и латерали, дал нам возможность картировать зоны с интенсивностью проявления тектонических деформаций и повышения трещиноватости.

Научная новизна работы

1. Выполнено теоретическое обоснование и экспериментальное исследование связей сейсмических полей и зон повышенной трещиноватости на основе использования сейсмических атрибутов. При проведении данных работ применялся новый, альтернативный принцип вычисления когерентности, в котором угол наклона волн используется не в качестве дополнительного, а в качестве основного параметра, что позволяет сделать оценку когерентности не зависящей от результатов корреляции.

2. Предложена новая технология, основанная на анализе изменчивости формы сейсмического поля и его атрибутов, для прогноза и оценки ФЕС на вероятностно-статистической основе.

3. На основании гипотезы о закономерности изменения АВПД по площади в осадочном чехле обоснована и реализована возможность применения сейсмических атрибутов для уточнения положения зон АВПД.

4. Выполнен канонический анализ сейсмических атрибутов применительно к решению геологических задач. Полученные данные позволяют значительно повысить достоверность выбора сейсмических атрибутов, используемых для прогноза вероятности (тренда) изменения петрофизических свойств при геологическом (стохастическом) моделировании.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Определены и продемонстрированы прогностические возможности оценки зон повышения трещин коллекторов с помощью комплексирования геометрических атрибутов на терригенных отложениях на одном из месторождений Западной Сибири.

2. Разработаны методические основы автоматизации комплексирования множественного анализа сейсмических атрибутов для прогноза ФЕС трещинно-кавернозных коллекторов. В качестве примера использованы данные по одному из месторождений Томской области.

3. На основе комплексирования данных сейсморазведки, ГИС и ГДИС выполнено прогнозирование зон АВПД для оценки продуктивности пластов на одном из месторождений Томской области.

Этапы решения задач исследования

1. Анализ применимости различных геолого-геофизических данных для прогнозирования трещиноватости коллекторов.
2. Сбор материалов по сейсморазведке МОГТ 2D и 3D, данных ГИС и ГДИС по трем месторождениям Западной Сибири.
3. Анализ возможностей геометрических атрибутов и их комплексирование для выделения зон повышения трещин.
4. Анализ результатов применения сейсмических атрибутов для прогнозирования ФЕС коллекторов на реальных геологических объектах.
5. Анализ применения сейсмических атрибутов в сейсмической интерпретации с использованием примеров с целью эффективного решения инженерно-геологических задач на примере месторождений УВ Западной Сибири.

Степень достоверности результатов

Проверка на одной из экспериментальных площадей прогностических возможностей методик прогноза ФЕС коллекторов трещин кавернозных типов показала высокую достоверность прогноза. Для 11-ти скважин, результат анализа для данных по рассматриваемому месторождению завершился с сильной канонической корреляцией $R=0,87$ между сейсмическими атрибутами и ФЕС. Выбор сейсмических атрибутов для прогноза ФЕС выполнялся согласно методическим рекомендациям по использованию данных сейсморазведки для подсчета запасов нефти и газа, ОАО «ЦГЭ», Москва, 2006. А, именно:

- С наилучшим визуальным качественным отображением геологического строения пласта.
- Имеющие наиболее высокий коэффициент корреляции со значениями ФЕС по скважинным данным ($KK=0.67$).
- Имеющие наибольшую значимость вклада в уравнение множественной регрессии.
- Дающие в комбинации с другими атрибутами максимальное значение коэффициента множественной корреляции и наилучшее количественное отображение строения пласта.
- Слабо коррелируемые между собой.

Информативность геометрических атрибутов для прогнозирования интенсивности распространения трещин в кавернозных коллекторах в целевых пластах подтверждена данными ГИС и материалами бурения.

Приведённые в работе результаты авторского локального прогноза в основном хорошо коррелируют с результатами других исследователей.

Структура работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения, содержит 137 страниц текста, 54 рисунка, 10 таблиц, 2 схемы. Библиография включает 147 наименования, из них 2 патента на изобретения.

Апробация результатов исследования. Основные положения и результаты исследований докладывались на Международном симпозиуме имени академика М. А. Усова (Томск, 2016), на 5-й Международной научно-практической конференции «EAGE ГЕОБАЙКАЛ 2018» (Иркутск, 2018), на XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных (Томск, 2018), на Международном симпозиуме имени академика М. А. Усова (Томск, 2019), на 22-й научно-практической конференции по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа «EAGE Геомодель 2020» (Геленджик, 2020).

Основные результаты диссертационного исследования изложены в 7-и публикациях диссертанта. Из них 3 статьи опубликованы в журналах перечня ВАК Минобрнауки Российской Федерации для публикации результатов кандидатских и докторских диссертаций.

1. ВОЗМОЖНОСТИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТРЕЩИНОВАТОСТИ КОЛЛЕКТОРОВ

Глава посвящена систематизации, обобщению и анализу существующих методик изучения трещиноватости, а также физическим основам применения сейсморазведочных данных для картирования трещин.

Сегодня общепринятым считается понимание трещины как некоторой поверхности, которая непосредственно связана с нарушением сплошности среды и/или с потерей сцепления блоков горной породы. Эти физические процессы называются разрывом.

При этом, в горной среде могут существовать как трещины, так и разломы, которые отличаются друг от друга главным образом по отсутствию/наличию смещений пород. Эти отличия определяют и различия в частоте встречаемости трещин и разломов. Первые встречаются значительно реже и обязаны своим появлением главным образом напряжениям, возникающим в ходе процессов тектоногенеза. Природа возникновения самих напряжений особой роли не играет. Не так важно с чем они связаны, а важен сам факт возникновения напряжений. Однако надо учитывать, что различия в природе возникновения напряжений неизбежно приводят к широким различиям в масштабе возникающих трещин.

Как правило, большинство авторов применительно к образованию трещин говорят о трёх стадиях деформации горной среды, развивающихся последовательно.

1. **Стадия упругой деформации.**
2. **Стадия пластической деформации.**
3. **Стадия хрупкой или разрывной деформации.**

Установление повышенно трещиноватых зон возможно различными методами, к которым относятся исследования керна, геофизические методы исследования скважин, из которых наиболее корректные результаты даёт комплекс, предложенный компанией Шлюмберже, а также сейсмические методы, применение которых основано на предположении о существовании т. н. «поля детерминированного хаоса». В работы был выполнен анализ их применимости, возможностей и ограничений.

С точки зрения применения сейсморазведки важным для оценки трещиноватости является вопрос о том, какие же именно характеристики упругих волн несут информацию об этих геологических особенностях среды. Сегодня большинство исследователей считают, что это прежде всего энергия, затухание и амплитуда, относимые к динамическим параметрам волн. Схема изменения этих параметров в зависимости от изменения трещиноватости приведена на рисунке 1. Также к параметрам, обладающим весьма высокой чувствительностью, следует отнести характеристики волн Стоунли-Лэмба. Очевидно, что спектр и форма акустического сигнала при повышении трещиноватости меняют свою форму в степени, достаточной для уверенной фиксации. Такие же изменения наблюдаются и в случае нарушения фазовой корреляции поперечных волн, а также при резком уменьшении амплитуды наблюдаемых волн.

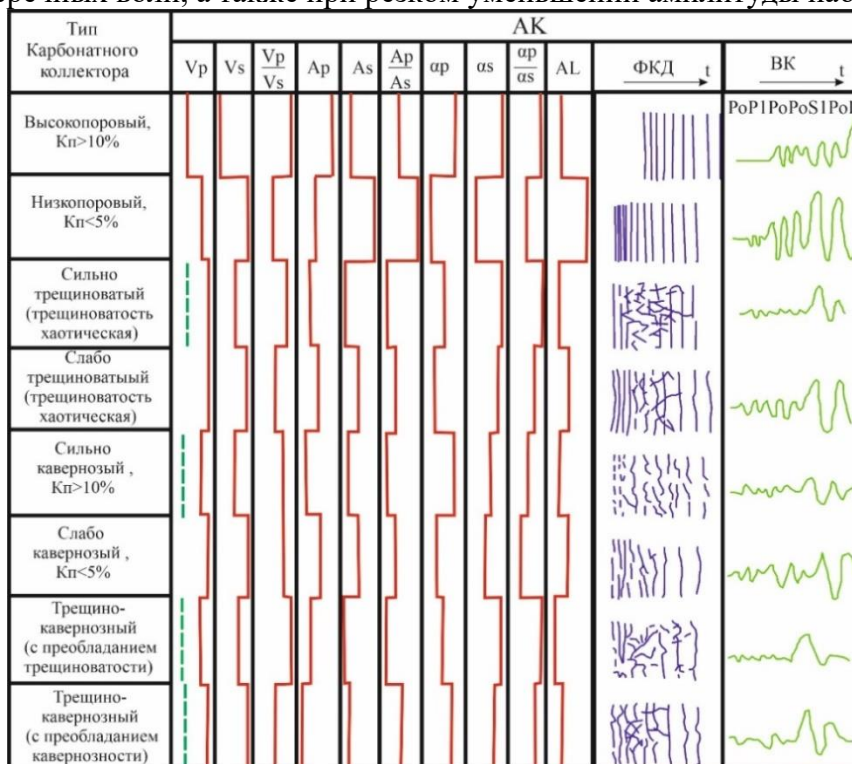


Рис. 1.1. Физико-геологическая модель связи акустических параметров с видами пустотного пространства

Кп – коэффициент пористости, АК – акустические параметры, V_p – скорость продольной волны, V_s – скорость поперечной волны, A_p – амплитуда продольной волны, A_s – амплитуда поперечной волны, α_p – коэффициент затухания продольной волны, α_s – коэффициент затухания поперечной волны, AL – амплитуда волн Стоунли-Лэмба, ФКД – фазовая корреляция диаграмм, ВК – волновая картина

Также наиболее перспективным направлениям развития технологий анализа сейсмических данных применительно к оценке трещиноватости относятся работы, связанные с разработкой и совершенствованием методик анализа атрибутов волнового поля.

1.5. Выводы к 1 главе

1. Современные технологии анализа сейсморазведочной информации в отношении изучения трещиноватости являются косвенными методами, несмотря на их сравнительно высокую точность. Причиной этого в том, что сейсмический отклик, аналогичный отклику от трещиноватости, могут формировать и другие геологические неоднородности.

2. Ни один монометод не обеспечивает возможности получения исчерпывающей информации о структуре трещиноватости. Поэтому необходимо комплексирование методов. В отношении сейсморазведки это заключается в комплексном использовании нескольких сейсмических атрибутов, позволяющих получать информацию о трещиноватости независимо друг от друга. Такой подход значительно повышает достоверность результатов при одновременном повышении их детальности. Требуемой достоверности прогноза характеристик трещиноватости среды можно добиться только комплексировав методы определения трещиноватости по данным ГИС и с использованием сейсмических атрибутов.

3. *Методика оценки информативности сейсмических атрибутов в целях изучения трещиноватости сегодня может быть охарактеризована как явно недостаточная, при том, что все согласны с потенциально высокой эффективностью атрибутного анализа для решения этой задачи. Недостаточно изучены также вопросы подбора и анализа атрибутов.*

4. Степень изученности и проработки методики комплексирования сейсмических атрибутов, используемых для решения задач прогнозирования трещиноватости, сегодня невысока. Уровень решаемых задач требует перехода от интуитивных к технологичным методам комплексирования.

2. ИНФОРМАТИВНОСТЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ АТТРИБУТОВ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТРЕЩИНОВАТОСТИ КОЛЛЕКТОРОВ

Глава посвящена традиционным атрибутам для описания разломов и трещиноватости. Предложены альтернативные и инновационные атрибуты для оценки вероятности интенсивности трещиноватости.

Один из наиболее универсальных вариантов классификации сейсмических атрибутов был предложен Танером, разделившим атрибуты на геометрические и физические. Атрибуты, чувствительные к изменениям геометрических характеристик сейсмических событий и способные улучшать их видимость, называются геометрическими. Они отвечают за картирование тектонических нарушений, а также за дешифрирование структуры и стратиграфических особенностей разреза. Основными информативными атрибутами являются «когерентность», «объёмная кривизна» и «хаос». Их возможности в этом направлении основаны на представлениях о том, что зоны повышенной трещиноватости возникают в осевых частях складок как следствие существующих там эффектов растяжения и деструкции.

Также показано, что в комплекс сейсмических атрибутов целесообразно включать атрибуты «наибольшая положительная кривизна» (K_+) и «наибольшая отрицательная кривизна» (K_-), которые чувствительны к самому факту нарушения сплошности и направлениям её нарушения, но при этом форма нарушения в них практически не отображается. На рисунке 2.1 приведены рассчитанные автором по данным по участку Проточный-2 (Томская область) горизонтальные срезы кубов наибольшей положительной кривизны (K_+) и когерентности по горизонту Ю₁. Обращает на себя внимание тесная

корреляция (видимая визуально) между аномалиями повышенных значений обоих параметров и областями с повышенной плотностью развития трещин (зоны повышенной трещиноватости). Особенности поведения дизъюнктивных структур очевидно соответствуют особенностям структур полей распределения атрибутов. При этом атрибут «когерентность» даёт более достоверные результаты.

В работе нами предложен новый подход к построению кубов когерентности (атрибуты Coh_disp, Coh_min, Coh_max). Ниже приведены основные положения технологии разработки и адаптации алгоритмов Dir_COH (Direction Coherence) вычисления когерентности для трёхмерного выделения разломов и прогноза зон тектонической трещиноватости, проиллюстрированы результаты её применения.

На данный момент известно несколько методов, базирующихся на вычислении функции взаимной корреляции близлежащих трасс сейсмического куба, коэффициентов подобия, собственных значений корреляционной матрицы, локальной структурной энтропии или ошибки предсказания амплитуд. Данные алгоритмы получили широкое применение и используются при прогнозе зон тектонических деформаций и трещиноватости. Отмечается, что наибольшую эффективность эти методы приобретают при использовании результатов прослеживания (добавляется учёт наклона горизонтов). Однако в этом случае большое влияние на оценку когерентности оказывает качество прослеживания волн: ошибки интерпретатора вносят существенный вклад в картину когерентности.

При выполнении настоящей работы нами использовался новый, альтернативный принцип вычисления когерентности, в котором угол наклона волн используется не как дополнительный, а как основной параметр, что позволяет сделать оценку когерентности не зависящей от результатов корреляции. Согласно этому подходу, вычисления проводятся в два этапа. Вначале проводилось вычисление *куба площадок*: множества оценок кинематических (время и углы наклона) и динамических (амплитуда, энергия и т. п.) характеристик сейсмических волн, слагающих интерференционную картину каждой трассы куба.

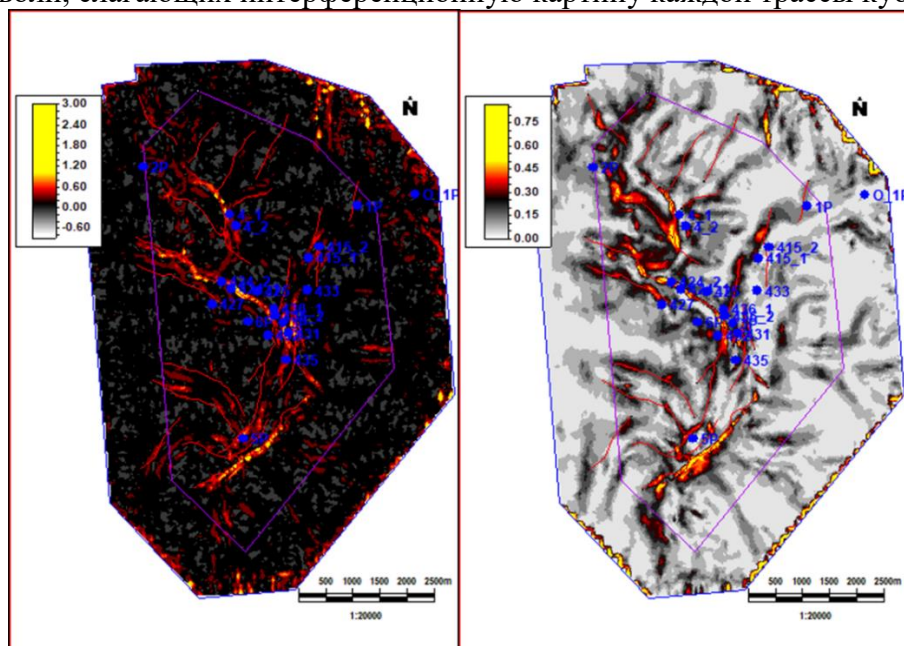


Рис. 2.1. Пример наиболее информативных для трассирования разломов и картирования зон трещиноватости в плане сейсмических атрибутов (горизонтальные срезы кубов наиболее положительной кривизны (слева) и когерентности (справа) по основным отражающим горизонтам I Ia+15ms). Показаны скважины и их номера, а также разломы, предполагаемые автором по результатам интерпретации

Куб площадок. Если представить сейсмический куб как функцию трёх аргументов $F(x, y, t)$, где (x, y) определяют координаты, а t – время, то положение осей синфазности (горизонтов, годографов и т. п.) в кубе необходимо описывать функцией двух аргументов $T(x, y)$ – уравнение поверхности, в общем случае нелинейное и разрывное. В точке пространства с координатами (x_0, y_0) , где функция не претерпевает разрыва, можно описать уравнение касательной плоскости:

$$t(x, y) = t_0 + \gamma_x(x - x_0) + \gamma_y(y - y_0),$$

где $t_0 = T(x_0, y_0)$, $\gamma_x = \left. \frac{\partial T(x, y)}{\partial x} \right|_{x=x_0, y=y_0} = tg(\alpha)$ и $\gamma_y = \left. \frac{\partial T(x, y)}{\partial y} \right|_{x=x_0, y=y_0} = tg(\beta)$ – производные

(тангенсы углов наклона касательных) по соответствующим направлениям. Известно, что в малой окрестности точки (x_0, y_0) уравнение поверхности и уравнение касательной близки $T(x, y) \approx t(x, y)$. В данной окрестности определим *отражающую площадку* уравнением (1) с параметрами $(x_0, y_0, t_0, \alpha, \beta)$ (Рис. 2.2а). При наличии достаточно частой сетки точек (x_i, y_i) всю поверхность $T(x, y)$ можно аппроксимировать множеством отражающих площадок $\{(x_i, y_i, t_i, \alpha_i, \beta_i)\}$ (Рис. 2.2б).

Для оценки параметров отражающих площадок применяется схема (Рис. 2.2), основанная на сканировании углов наклона и направленной фильтрации трасс, расположенных вокруг оцениваемой точки (x_0, y_0) . Количество используемых трасс при этом входит в параметры расчёта. Результаты фильтрации представляют собой куб сканирования, положение экстремумов которого принимается за оценки времени и углов наклона отражающих площадок:

$$(t_i, \alpha_i, \beta_i) = \arg \text{extr} [F_{\text{вых}}(t, \alpha, \beta)].$$

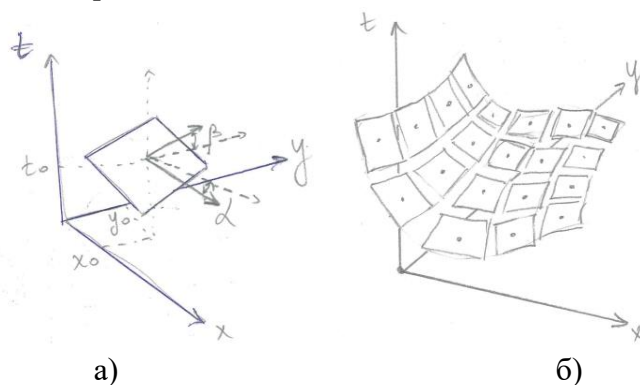


Рис. 2.2. К понятию «отражающая площадка» и её параметры

Кубом площадок назовём множество всех найденных оценок отражающих площадок.

При расчёте оценок определялись границы поиска углов наклона в диапазоне ± 81 отн. град и анализируемого частотного диапазона 5–90 Гц. Кинематические оценки геометрически описывают площадки в малой ограниченной пространственно-временной области. В области положения регулярной волны, т. е. волны, обладающей достаточно высокой устойчивостью кинематических и динамических параметров, площадки являются кусочно-линейной аппроксимацией горизонта и обладают свойством взаимной согласованности (через них можно провести гладкую непрерывную или имеющую конечное число разрывов кривую). В зонах, где сейсмическая запись теряет свойство регулярности, площадки теряют свойство согласованности.

На втором этапе вычислений проводился расчёт и анализ взаимной согласованности полученных оценок по различным мерам когерентности: дисперсия углов – статистика углов наклона в скользящем пространственно-временном окне, «сумма минимальных рассогласований» СМР и «максимум минимальных рассогласований» ММР – многомерные геометрические меры расхождения площадок

Критерии оценки когерентности. Когерентность и регулярность сейсмической волны являются двумя взаимосвязанными параметрами. Причём степень этой связи достаточно высока. Как уже было отмечено нами выше, понижение когерентности обусловлено быстрым

изменением формы волны в пространстве, т. е. нарушением условия её регулярности. Как показывают исследования, при соблюдении условия ограничения диапазона сканирования

углов $\Delta\gamma \in \left[-\frac{1}{(2N+1)\Delta x f_0}, \frac{1}{(2N+1)\Delta x f_0} \right]$, где $(2N+1)$ – количество трасс, f_0 – несущая частота,

Δx – расстояние между трассами, по результатам сканирования регулярной волны будут определены устойчивые оценки параметров волн, и только они, а по результатам сканирования нерегулярных волн будут получены оценки «ложных» отражающих площадок, которые не характеризуют отражающие свойства среды. Для выделения мест расположения таких «ложных» площадок введём *меры когерентности*. В отличие от ранее известных, предлагаемые меры имеют низкие значения в зонах высокой когерентности (регулярности) волн.

Дисперсия углов (статистический подход). Статистическая характеристика, рассчитываемая в скользящем окне, ограниченном по пространству и времени:

$$C_{cov}(x, y, t) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left[(\alpha_i - \bar{\alpha})^2 + (\beta_i - \bar{\beta})^2 \right],$$

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \alpha_i, \bar{\beta} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \beta_i,$$

где N – количество отражающих площадок, попавших в окно $[x \pm Z_0, y \pm Z_0, t \pm T_0]$, (α_i, β_i) – параметры этих площадок.

Анализ данных, приведённых на рисунке 2.3, показывает, что в области повышенно трещиноватых пород в пределах продуктивного интервала когерентность характеризуется существенно повышенной изменчивостью, и степень её дифференциации значительно выше, нежели в менее трещиноватой части пород. При этом сами тектонические нарушения проявлены в виде линейных зон повышенной когерентности, что, собственно говоря, и является прямым признаком прогноза этих зон.

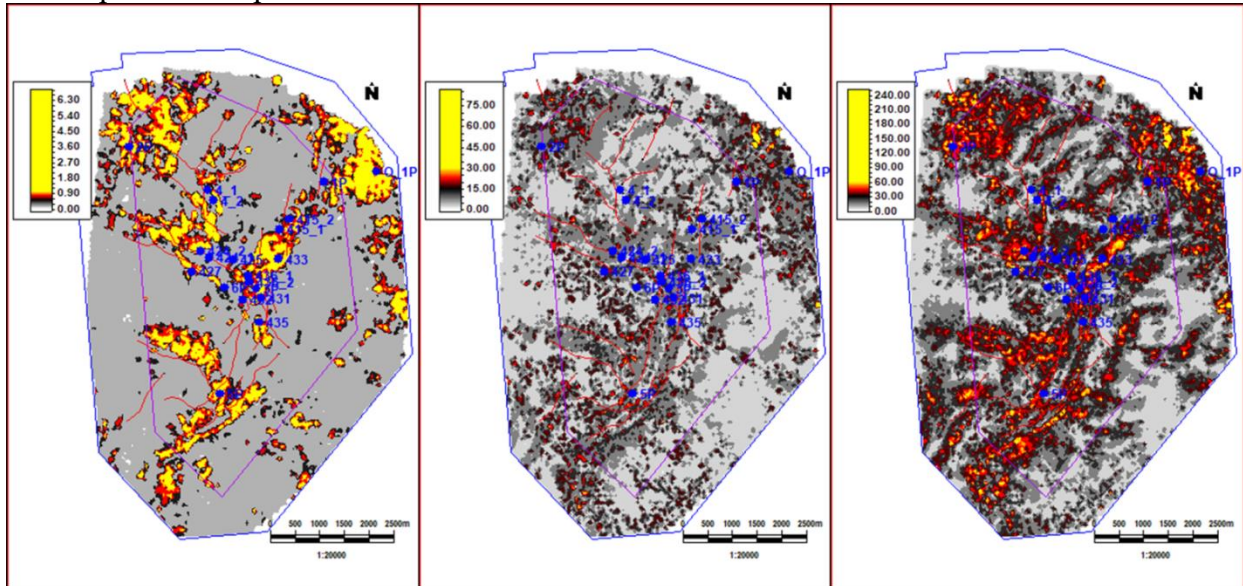


Рис. 2.3. Горизонтальный срез куба когерентности по горизонту Ю₁

Куб рассчитан по технологии DirCON а) дисперсия углов (справа), б) критерий максимума минимального рассогласования (по центру), в) критерий суммы минимальных рассогласований (слева) по основным отражающим горизонтам I Ia+15ms. Показаны скважины и их номера, а также разломы, предполагаемые автором по результатам интерпретации

Критерий максимума минимального рассогласования. Предварительно введем меру рассогласования двух площадок как интеграл от квадрата разности уравнений площадок, геометрический смысл которого близок к площади фигуры, ограниченной сверху и снизу этими площадками (Рис. 2.4):

$$\delta P = \frac{1}{4\Delta x \Delta y} \sqrt{\int_{-\Delta x}^{\Delta x} \int_{-\Delta y}^{\Delta y} (t_1(x - x_1, y - y_1, t - t_1) - t_2(x - x_2, y - y_2, t - t_2))^2 dy dx},$$

где $\Delta x = |x_1 - x_2|$ и $\Delta y = |y_1 - y_2|$ определяют расстояние между центрами площадок. δP будет равна нулю только в случае, когда две площадки лежат на одной плоскости. Чем больше кривизна поверхности, которую можно провести через эти площадки, тем больше мера δP . Определяется мера δP в размерности времени.

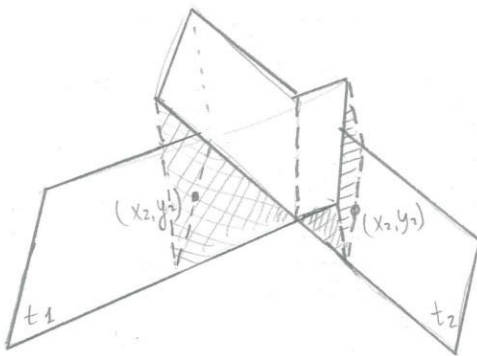


Рис. 2.4. Область, образованная пересечением отражающих площадок

Критерий максимума минимального рассогласования (ММП) с помощью меры рассогласования определяется согласно следующему алгоритму.

Для конкретной точки с координатами (x_0, y_0) последовательно выбираются все площадки с этими координатами, для каждой площадки ищутся площадки с соседних трасс, обладающие минимальной мерой рассогласования (Рис. 2.5).

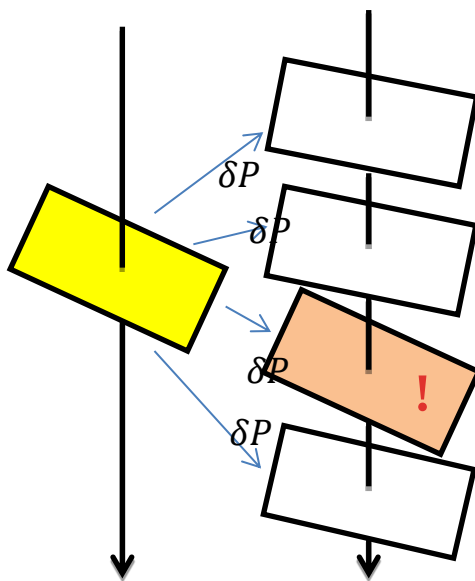


Рис. 2.5. Выбор ближайших площадок, обладающих минимальной мерой рассогласования

Среди найденных площадок выбирается площадка с максимальной мерой согласования (Рис. 2.6б). Эта мера определяет значение куба когерентности в точке (x_0, y_0, t_0) и её временной окрестности $[t_0 - W, t_0 + W]$, если в этой окрестности не определено значение, большее по величине (Рис. 2.6в).

Критерий суммы минимальных рассогласований. Критерий суммы минимального рассогласования (СМР) с помощью меры рассогласования определяется по тому же алгоритму, что и для максимальной меры согласования. Различие состоит в том, что в процессе расчёта ищутся площадки с соседних трасс, обладающие минимальной мерой рассогласования. Затем полученная мера также добавляется в значение куба когерентности в точке (x_0, y_0, t_0) и её временной окрестности $[t_0 - W, t_0 + W]$.

Использование сейсмического атрибутивного анализа в целях прогноза трещиноватости наиболее эффективно в случае, когда залежи углеводородов локализованы в порово-трещинных

резервуарах, обеспечивающих более высокие дебиты углеводородов. На изучаемой территории к разломным зонам приурочены многие месторождения. Порово-трещинные резервуары формируют сложную макро- и микроструктуру пустотного пространства. В условиях плотного коллектора продуктивность контролируется трещинной частью резервуара. Для прослеживания тектонических нарушений в работах использовались данные кубов когерентности, полученных по технологии DirCON.

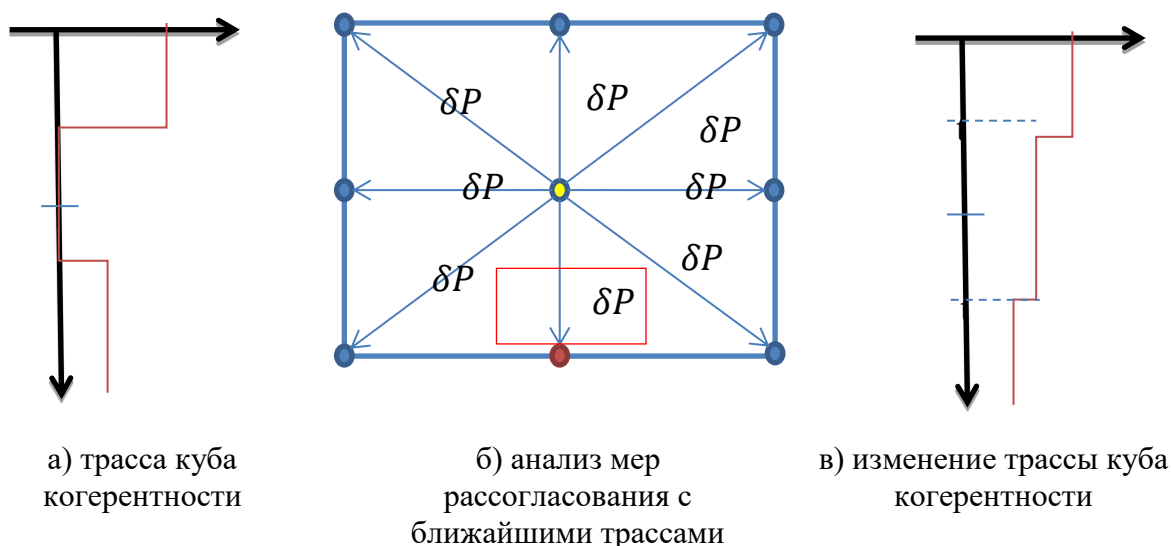


Рис. 2.6. Технология формирования трассы куба когерентности по критериям MMP и CMP

Также нами была проанализирована эффективность атрибута **Ant-tracking (Шлюмберге)**. Тестовые исследования выполнены по данным участка Проточный-2, разрез которого близок к типовому. Продуктивными являются пласты Б9 и Ю1. В качестве нефтематеринских рассматриваются горизонты мелового или юрского возраста, нефть из которых мигрировала после образования трещиноватости. Основной тип коллекторов на месторождении – трещинные. Всего их выделяется два, при этом они несколько различаются друг от друга. Первый тип более однороден. Кроме того, его мощность больше. Второй характеризуется меньшими мощностью и однородностью. В то же время трещиноватость распределена достаточно сложно вне зависимости от типа коллектора.

При изучении месторождения было установлено, что в его пределах выделяется как минимум три типа трещин, оказывающих различное влияние на нефтеизвлекаемость.

1. *Заполненные или частично заполненные трещины, которые, в свою очередь, могут быть вертикальными, субвертикальными и иметь угол наклона 30–35°. Для них характерна плотность 18–36 л/м при раскрытости 0.1–1.8 мм.*

2. Трещины, которые частично или полностью залечены кремнием и/или кальцитом. Этот тип нарушений преимущественно характерен для более мощного коллектора. Залечивающая минерализация, как правило, полифазна.

3. Открытые трещины. Встречаются в обоих коллекторах. Направление не определено и меняется хаотически. Раскрытость – 0.1–0.2.

Приведённый ниже рисунок (Рис. 2.7) показывает куб, смоделированный алгоритмом Ant-tracker с использованием сейсмических (атрибут «хаос») и керновых данных. На рисунке в явном виде видны зоны трещиноватости. При этом все они пространственно приурочены к тектоническим нарушениям.

В результате этих процессов в зоне исследования удалось смоделировать единую систему трещин и разломов, хорошо согласующуюся с априорной моделью трещиноватости верхнеюрского комплекса района исследования которая говорит о существовании развитая сеть ветвящихся трещин.

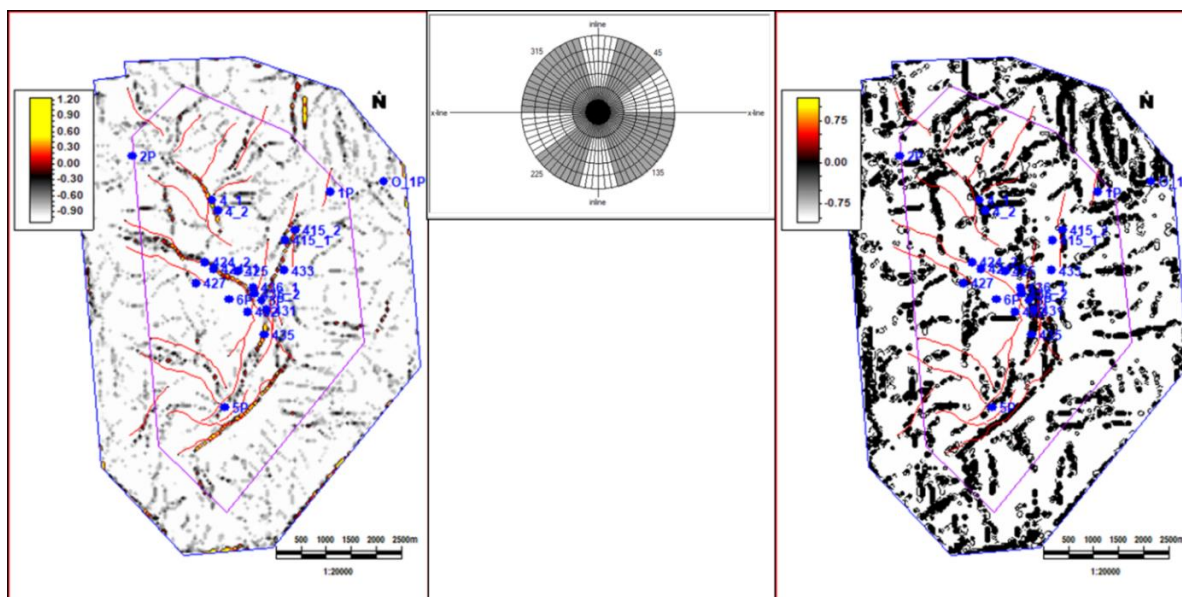


Рис. 2.7. Априорная модель трещиноватости верхнеюрского комплекса по результатам анализа атрибута Ant-tracking (Chaos)-справа без применения фильтра (фактические направления трещин по керну), слева с применением фильтра. Показаны скважины и их номера

Также нами были проанализированы результаты применения технологии **атрибутного анализа FSF (Form Similarity Function)**, оценены его возможности и эффективность.

Проблемы изучения внутренней структуры трещинных коллекторов, прогноза фильтрационно-емкостных свойств, а также характера нефтенасыщения достаточно сложны. Несмотря на обилие методик, предпочтение отдано сейсмической инверсии, диагностирующей значимые изменения акустических свойств по данным ГИС и МОГТ. Однако существует много перспективных объектов, для которых необходимо решать задачи выявления коллекторов и определения характера их насыщения в более широком диапазоне глубин и при резкой изменчивости геологической модели по латерали, где допускается пространственное изменение формы импульсов. В таких условиях необходим комплексный последовательный подход к совместной интерпретации данных сейсморазведки, а также применение современных алгоритмов и технологий прогноза петрофизических свойств, отличительной чертой которых является способность максимального учёта разнородной априорной геолого-геофизической информации и создание объёмных лито-фациальных и петрофизических моделей. В данной работе предлагается подобная новая технология, основанная на анализе изменчивости формы сейсмического поля и его атрибутов.

Технология FSF. В качестве меры подобия форм может быть использована одна из следующих известных величин: коэффициент корреляции Пирсона, Евклидово расстояние и Манхэттенское расстояние. Наиболее эффективной мерой из приведенного списка, в рамках поставленной задачи, является Манхэттенское расстояние:

$$k_i = \int_{\Delta t_1}^{\Delta t_2} |X(t - T(x_0, y_0)) - Y_i(t - T(x_i, y_i))| dt,$$

где $X(t)$ – трасса МОГТ в точке с координатами (x_0, y_0) , обычно это координаты скважины, в которой известны характеристики среды; $Y_i(t)$ – трасса МОГТ в точке с координатами (x_i, y_i) ; $[\Delta t_1, \Delta t_2]$ – границы временного окна, заданного относительно опорного горизонта $T(x, y)$. Этому служит ряд причин: коэффициент корреляции Пирсона не всегда корректно отвечает на вопрос схожести волн, т. к. его основной целью является определение степени линейной зависимости. При расчёте Евклидова расстояния используются процедуры возведения в степень и вычисления квадратного корня, являющиеся трудоёмкими при проведении расчётов.

Однако ввиду того, что k_i является ненормированной величиной, зависящей от значений относительных амплитуд сейсмического поля, интерпретация и сопоставление рассчитываемых

прогнозных карт по k_i может быть затруднительной. Расчётную формулу Манхэттенского расстояния предлагается модифицировать к виду (Form Similarity Function):

$$FSF_i = e^{-\alpha k_i} = e^{-\alpha \int_{\Delta t_1}^{\Delta t_2} |X(t-T(x_0, y_0)) - Y_i(t-T(x_i, y_i))| dt},$$

где α – нормировочный коэффициент, определяющий скорость затухания функции и рассчитываемый по формуле:

$$\alpha = \frac{\ln p_{\min}}{2 \int_{\Delta t_1}^{\Delta t_2} |X(t-T(x_0, y_0))| dt},$$

где $p_{\min}$ – вероятность схожести геолого-геофизических характеристик среды, когда формы зарегистрированных волн находятся в противофазе (принимается близкой к нулю). Такая модификация позволяет ограничить область значений FSF_i в более удобном для анализа диапазоне $[0,1]$. $FSF_i=1$ свидетельствует о равенстве форм в рассматриваемых точках, $FSF_i=0$ – о их полной противоположности.

На рисунке 2.8 приведена карта распределения сейсмофаций, отображающих схему развития разломов и связанную с ними систему зон разуплотнения пород в интервале надугольной пачки. В исследовании использовались трассы куба градиента амплитуды азимута 45 и 135 градусов. Анализ полученных данных дал нам возможность утверждать, что в центральной и северной частях выделяются области интенсивного проявления тектонических деформаций, следствием которых, в условиях роста средних давлений и температур, является система мелких (в том числе открытых) трещин, концентрирующихся в зоны локализации повышенной пустотности (области разуплотнения). Типы разрушения и предел упругости пород связаны с рядом факторов, в том числе и с агрессивностью флюидов. В целом, эти процессы влияют на форму волны. На изменение отражающих свойств также оказывает влияние механизм формирования трещин. Математически дилатансионный эффект означает линейную пропорциональность неупругих свойств (вязкость среды) и объёма (объёмные и сдвиговые деформации) – функции давления и напряжения одновременно. Физически дилатансия (изменение ФЕС при сдвиге) – это генерирование трещинной пустотности (вторичные изменения) в породе или изменение существующей системы пор и трещин при заполнении их углеводородами. Поэтому мы видим анизотропное поведение трещиноватости (Рис. 2.9).

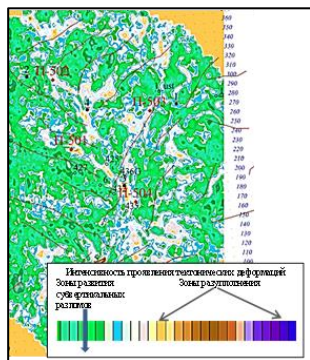


Рис. 2.8. Карта развития тектонических деформаций

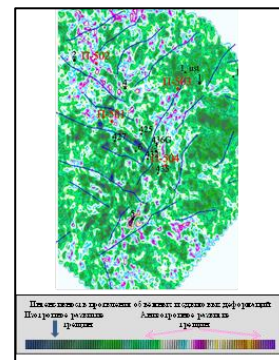


Рис. 2.9. Карта распределения вторичной трещиноватости

Показаны скважины и их номера, а также разломы, предполагаемые автором по результатам интерпретации

Вышеприведённые практические эксперименты подтвердили главное: резервуар нефти и газа – сложное природное образование, не вписывающееся в модель однородного и изотропного объекта и не подлежащее надёжному определению его фильтрационных свойств без определения особенностей амплитуды его горизонтальной подвижки.

Анализ неупругих свойств (дилатансии, трещиноватости, разуплотнения, разгрузки тектонических напряжений, раскрытость трещин и увеличение объема пустотного пространства) нефтегазовых резервуаров на отклик формы волны сейсмических данных полей горизонтального сдвига позволяет с высокой надёжностью осуществлять прогноз каналов миграции и областей концентрации углеводородов (по сейсмическим данным). На ряде объектов, благодаря новым способам сейсмической интерпретации, изучена система разломов, внутри фундамента оконтурены блоки разного внутреннего строения кристаллических пород, выявлены участки развития трещиноватости.

2.8. Выводы ко 2 главе

1. Плотность распределения трещин в геологической среде может быть количественно оценена в случае применения геометрических сейсмических атрибутов. Они же могут обеспечить эффективную оценку геологических рисков.

2. Для картирования геологических границ и разломов наиболее эффективны технологии, при которых используются атрибуты «хаос» и «когерентность». При этом когерентность даёт возможность оперативной обработки данных по идеологии Big Data с количественной оценкой трещиноватости и сложно оцениваемой другими способами стратиграфической информации.

3. При необходимости расширения набора атрибутов на куб интерпретируемых данных целесообразно применение атрибута «объёмная кривизна».

4. Из всех сейсмических атрибутов, связанных с кривизной, в отношении трещиноватости наиболее информативными являются наиболее отрицательные и наиболее положительные основные кривизны.

5. Наиболее надёжными с точки зрения прогноза трещиноватости являются хаос, когерентность и кривизна. В случае необходимости количественных оценок их расчёт должен дополняться скважинной информацией, позволяющей получать априорную информацию о направлении и интенсивности развития трещин.

6. Форма отражённой волны, извлечённая из сейсмической записи, несёт в себе интегральную характеристику породно-слоевых ассоциаций геологической среды. Соответственно, изменение формы волны по вертикали и латерали, с сейсмической точки зрения, должно отражать смену бассейновых и фациальных обстановок, свидетельствовать о пространственном положении и интенсивности развития тектонической трещиноватости, устанавливать границы неоднородностей внутри кристаллического фундамента, представляющего собой монолитно-гетерогенную среду, в противоположность осадочным толщам, где доминируют регулярно-слоистые толщи.

3. КАНОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ В ПРОГРАММЕ STATISTICA ДЛЯ ОЦЕНКИ ФИЛЬТРАЦИОННО-ЕМКОСТНЫХ СВОЙСТВ КОЛЛЕКТОРОВ

Глава посвящена интеллектуальному анализу данных в нефтегазовой отрасли. Был проведен канонический анализ геофизических данных для оценки фильтрационно-емкостных свойств коллекторов.

Общая идея канонического анализа в нашем случае состоит в наличии стохастической взаимосвязи между линейными комбинациями ФЕС и СА, которая в общем случае выглядит как: $a_1 * H_{ef_U1_1} + a_2 * H_{ef_U1_2} + a_3 * H_{ef_U1_3_4} = b_1 * Atr1 + b_2 * Atr2 + b_3 * Atr3 + \dots + b_n * Atrn$, где a, b – некоторые коэффициенты, $Atrn$ – атрибуты.

Поскольку СА и параметры ФЕС измеряются в одной и той же области, мы можем предположить, что их изменения, связанные с изменчивостью среды, практически одинаковы или подобны.

В настоящее время в области интеллектуального анализа данных в нефтегазовой отрасли используется обширный набор статистических методов (регрессионный и корреляционный анализ, факторный анализ по методике главного компонента, кластерный анализ, нейронные сети и т. д.) и моделей для представления, обработки и интерпретации пространственно-распределённой информации. По нашему мнению, выявить наиболее информативные СА для решения задачи многомерной регрессии можно каноническим анализом, который

целесообразно выполнить в одном из широко распространённых пакетов статистического анализа.

Основные проблемы, с которыми сталкиваются исследователи и специалисты по моделированию **трещиноватых коллекторов**, следующие: значительные вариации проницаемости, которые могут достигать нескольких порядков при одной и той же пористости; для пор в пластовом пространстве характерно весьма значительное многообразие форм и размеров. Могут встречаться как микропоры, так и каверны, а также обычно имеет место весь набор промежуточных размеров. Это приводит к тому, что распределение размера пор не соответствует нормальному и является многомодальным. Для порового пространства трещиноватых коллекторов характерна сложная система взаимодействия различных видов пустотного пространства; ФЕС в условиях трещинных коллекторов претерпевают существенные изменения во всех направлениях.

При этом осуществить достоверный прогноз этих изменений в большинстве случаев не представляется возможным; различия в составе скелета пород и условиях их залегания приводят к различиям в смачиваемости, которая к тому же может быть переменной; связь между проницаемостью и пористостью для трещиноватых коллекторов может не проявляться, либо она может быть нелинейной; прогноз литологии и ФЕС для условий трещиноватых коллекторов весьма затруднён. Отсутствуют технологии достоверного прогноза для межскважинного пространства; в результате проявления наложенных (диагенетических) процессов распределение ФЕС непосредственно осадочных пород может весьма значительно искажаться, чему способствует и локальность проявления наложенных процессов; для трещиноватых резервуаров характерна повышенная сложность строения, обусловленная как вышеназванными причинами, так и целым рядом других, менее значимых. В ряде случаев практически нет предпосылок для уверенной корреляции пластов в пределах таких коллекторов. Причём сделать это оказывается невозможным ни по сейсмическим, ни по керновым данным, ни по данным ГИС.

В наших исследованиях дополнительно к исходному кубу амплитуд мы рассчитали сейсмические атрибуты, для которых установлена связь с ФЕС трещиноватых коллекторов, а также те, которые по своей физической сути также имеют отношение к этим коллекторам.

Анализировались следующие динамические параметры: извлечённые значения амплитуд по срезам (Extract value), средняя энергия (Average energy), максимальные и минимальные значения амплитуд (Maximum/Minimum amplitude), сумма амплитуд (Sum of amplitudes), среднеарифметические/среднеквадратические/медианные значения / наиболее часто встречающиеся значения амплитуд в окне (Mean/RMS/Median/Most of), суммы положительных и отрицательных значений (Sum of positive/negative amplitudes) и др.

Всего для статистики было задействовано одиннадцать поисково-разведочных скважин внутри контура сейморазведочных работ 3D – Мыльджинского месторождения: 19P, 28P, 29P, 30P, 31P, 33P, 35P, 37P, 5P, 6P, 7P.

Для изучения сейсмических атрибутов, нами предлагается использовать канонический анализ. Этот вид статистического исследования представляет собой удачное обобщение множественной корреляции как меры зависимости между одной случайной переменной (в нашем случае – какого-либо петрофизического параметра) и подмножеством других случайных величин, в том числе сейсмических атрибутов.

Предварительная обработка данных. Для изучения коллекторов со сложно построенным пустотным пространством, характеризующихся сравнительно высокими трещиноватостью и кавернозностью, требуется использовать довольно большой набор СА. В нашем случае в результате работы в программном комплексе Petrel компании «Шлюмберже» имеется 2000 атрибутов. Затем используется *канонический анализ для выбора* информативного атрибута: для прогнозирования *Neff* – эффективная толщина нефтенасыщенности, *Hob* – общая толщина коллектора и коэффициент песчанистости. Расчёты выполнены в программе Statistica.

Проведение канонического анализа. Общая идея канонического анализа в нашем случае состоит в наличии стохастической взаимосвязи между линейными комбинациями ФЕС и

СА. Поэтому для её определения, после получения т. н. уравнения модели канонической корреляции, необходимо определить весовые коэффициенты для двух подмножеств переменных.

Результат анализа для данных по рассматриваемому месторождению завершился с сильной канонической корреляцией $R=0,87$ (Табл. 3.1). При подборе весов исходим из условия наибольшей коррелированности двух множеств СА и петрофизических параметров, т. к. слабо коррелированные друг с другом взвешенные суммы не представляют никакого интереса для геофизиков.

Пример прогноза ФЕС пласта Ю1-3_4 по результатам канонического анализа

Наибольшие коэффициенты корреляции прогнозных значений эффективных толщин с атрибутами показали такие динамические параметры, как средние значения амплитуд (average energy 0,6 и average sweetness 0,70). На рисунке 3.1 показана карта динамического атрибута average energy sweetness.

Прогнозная карта эффективных толщин была рассчитана из уравнения регрессии атрибута (average sweetness) со значениями эффективных толщин; эффективные толщины Ю1-3_4 изменяются от 1 м (скв. 33Р) до 13,6 м (скв. 7Р) при среднем значении эффективных толщин – 7,3 м. После сглаживания пространственным фильтром (3 итерации) исходных значений полученная прогнозная карта посажена на значения эффективных толщин по ГИС (Рис. 3.2), коэффициент корреляций прогнозных значений с ГИС составил 0.99, стандартная ошибка – 2 м, относительная погрешность 27%.

Оценка достоверности прогноза выполнена согласно методическим рекомендациям [Методические рекомендации по использованию данных сейсморазведки (2D, 3D) для подсчётов запасов нефти и газа ОАО «ЦГЭ», Москва, 2006] с использованием номограммы, показывающей взаимосвязь количества скважин и коэффициентов корреляции.

Вероятность прогноза для эффективных толщин пласта Ю1-3_4 находится в области «допустимой».

Таблица 3.1 Результат канонического анализа

Canonical R: ,87061 Chi(12)= 18.637 p=.23075 Канонический R: ,87061 Chi (12) = 18.637 p= .23075		
	Left – Set Левый набор переменных	Right – Set Правый набор переменных
No. of variables Количество переменных	3	4
Variance extracted Извлечённая дисперсия	100,000%	90.9404%
Total redundancy Общая избыточность	61.5435%	64.9865%
	H_ef_U1_1	V1
	Hef_U1_2	V2
	Hef_U1_3_4	V3
		V4
		V5

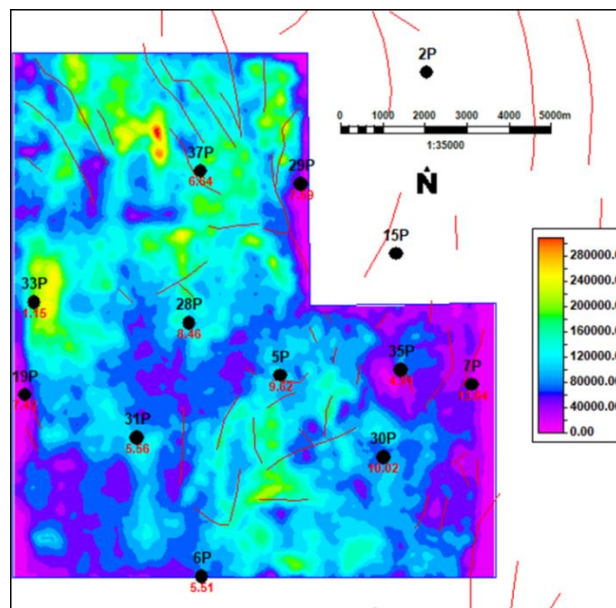


Рис. 3.1. Карта динамического атрибута average energy sweetness. Показаны скважины и их номера, а также разломы, предполагаемые автором по результатам интерпретации

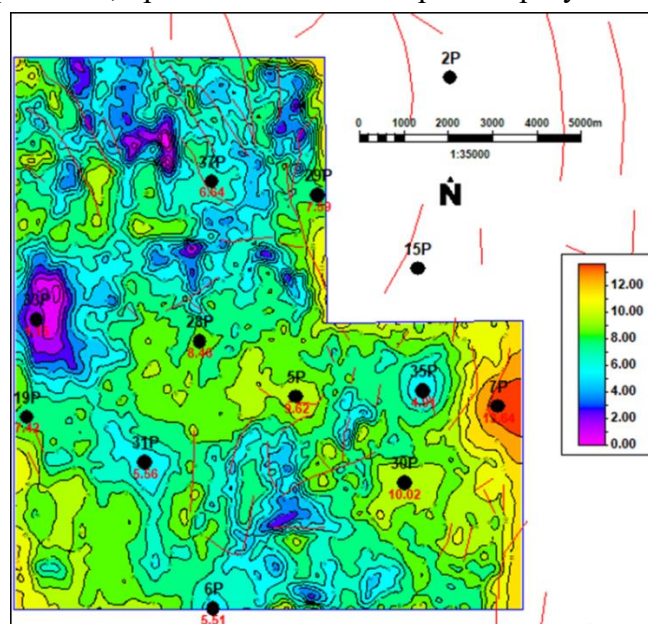


Рис. 3.2. Прогнозная карта эффективных толщин Ю1-3_4. Показаны скважины и их номера, а также разломы, предполагаемые автором по результатам интерпретации

Можно говорить о некоторой субъективности полученных ранее результатов. Субъективность обусловлена отсутствием гарантий необходимой точности полученных результатов и оптимальности подбора необходимых атрибутов. На самом деле, процесс статического прогнозирования ФЕС по СА обосновать сложно. Если эти зависимости существуют, то взаимосвязи давно были бы доказаны с точки зрения физики и геологии.

Также следует отметить, что для атрибутивного анализа важен не выбор отдельных СА, а их совместная изменчивость и взаимное влияние на петрофизические параметры. По результатам проведённых факторного и канонического анализа показано, что вариабельность СА объясняет не более половины изменчивости ФЕС, поэтому для повышения точности прогноза петрофизических параметров следует вернуться к полным данным по волновым функциям. Разрабатываемые методы анализа больших данных дают такую возможность в современных условиях.

Выводы к 3 главе

1. Детально характеризовать трещиноватый резервуар можно по результатам анализа сейсмических атрибутов. Этот факт определяет высокую значимость атрибутного анализа для решения подобных проблем. В данной главе предложено сочетание альтернативных подходов к прогнозу ФЕС коллекторов по сейсморазведочным данным. Полученные результаты можно рассматривать как одну из технологий прямого прогноза ФЕС по сейсморазведочным данным, как следствие установления связей между свойствами среды и сейсмическими атрибутами.

2. При наличии очень сильных корреляций между данными, даже весьма малые объёмы выборки в ряде случаев позволяют обнаружить значимые сейсмические атрибуты, существенно влияющие на петрофизические параметры и объясняющие большую часть вариабельности в данных. Для наших исследований базовой информацией послужили значения фильтрационно-емкостных свойств коллекторов трещиноватого типа по одиннадцати скважинам. В общем случае необходимо использовать существенно больше наблюдений, чем переменных. Соответственно, для двух канонических корней для получения достоверных оценок необходимо использовать как минимум в пятьдесят раз больше наблюдений, чем число исследуемых переменных.

3. В ходе работы был выполнен канонический анализ по данным фильтрационно-емкостных свойств и сейсмических атрибутов, а также была определена степень влияния сейсмических атрибутов на фильтрационно-емкостные свойства. Анализ полученных нами данных показывает их необходимость и важность для построения корректной геологической модели, которая чаще всего требуется в трёхмерном представлении. В дальнейшем эти данные, также как и модель, обычно используются как обоснование для принятия решения о заложении скважин. В работе предложена методика отбора сейсмических атрибутов, наиболее важных для изучения мест с нарушенными прочностными и деформационными свойствами пород, и определены эти атрибуты для Мыльджинского участка (Томская область). Для решения геологических задач обоснованное в результате канонического анализа использование сейсмических атрибутов открывает возможности получения более достоверных сведений о геологической среде.

4. АНАЛИЗ АТРИБУТОВ СЕЙСМИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ КАК СПОСОБ ИЗУЧЕНИЯ ЗОН АНОМАЛЬНОГО ПЛАСТОВОГО ДАВЛЕНИЯ

Глава посвящена изучению закономерностей формирования аномально высоких пластовых давлений с помощью сейсмических атрибутов. Также обоснована методика обнаружения зон АВПД по данным ГИС и проведён анализ атрибутов сейсмических полей с целью прогноза АВПД на Мыльджинском месторождении.

Основной особенностью проявления зон аномально высокого давления является тектоническая (а также, в зависимости от региона, неотектоническая) активность. Аномально высокое пластовое давление в этом случае возникает как следствие тектонической разгрузки по нарушениям, с выходом флюида на поверхность.

Для картирования с необходимой для принятия управленческих решений точностью зон АВПД необходимо иметь данные о геологическом строении разреза (в том числе непосредственно залежи), возможном наличии зон АВПД в непосредственной близости от района работ, а кроме того, об особенностях структуры поля пластовых давлений на изучаемой площади.

Общепринятой является следующая классификация методов прогнозирования и оценки АВПД: методы, реализуемые перед бурением, методы контроля АВПД в процессе бурения, методы мониторинга АВПД после бурения.

Обнаружение зон АВПД по материалам геофизических методов исследования скважин

Наиболее корректно зоны аномально высокого пластового давления выделяются в глинах, в пользу чего говорит сама природа возникновения зон АВПД. Причиной этого являются особенности катагенеза органического вещества, которые обуславливают пористость и флюидонасыщенность пластов. При этом наложенные эпигенетические процессы также

вносят свой значительный вклад в формирование таких зон. Величина их вклада обусловлена весьма высокой интенсивностью влияния вышеуказанных процессов, к которым относятся, в частности, наложенные карбонатизация и каолинизация, на особенности физических свойств горных пород.

В пределах зон аномально высокого пластового давления чаще всего наблюдается повышенное водородосодержание на фоне пониженных плотности, скорости распространения упругих волн и сопротивления. Эти петрофизические особенности разреза, учитывающие изменение физических свойств по вертикали, лежат в основе всех методик прогнозирования зон АВПД. Возникающие отклонения поведения пород от нормального поведения и делают возможным прогноз.

Рассмотрим ситуацию с изменением петрофизических характеристик глин в разрезе с наличием зон АВПД. Влияние гравитации на породы в разрезе приводит к их уплотнению на глубину, что сопровождается повышением сопротивления и скоростных характеристик разреза на фоне уменьшения водородосодержания. В этом случае глины, локализованные в покрышках коллекторов, обладают диаметрально противоположными характеристиками. На фоне разуплотнения для них характерны пониженные сопротивление и скорости упругих волн. Для таких разрезов закон изменения геофизических характеристик перестаёт быть нормальным, что отличает эти разрезы от нормальных. Кроме всего прочего, в случае наличия зон АВПД иногда отмечается понижение ПС и естественной гамма-активности. Эти факторы говорят о необходимости включения в комплекс изучения разрезов с АВПД нейтронного, акустического каротажей, каротажей ПС, КС, бокового, гамма- и гамма-гамма-каротажей.

Результаты выделения зон АВПД в разрезах Мыльджинского нефтегазоконденсатного месторождения по данным ГИС. Для практической (тестовой) проверки в качестве эталона нами было выбрано одно нефтегазоконденсатное месторождение (Мыльджинское), по которому имелись необходимые данные ГИС (Рис. 4.1).

Особенности геологического строения Мыльджинского месторождения, а именно связанные с пластами Ю₁ существенные изменения физических свойств кровельной части баженовской свиты, сделали возможным выполнение анализа только по образованиям куломзинской свиты.

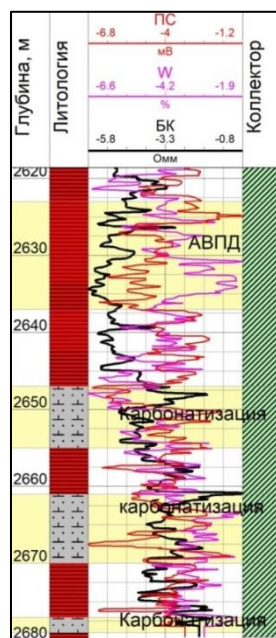


Рис. 4.1. Мыльджинское месторождение. Образования куломзинской свиты.

Интервал исследования 2618–2680 м скв. ХР

Хорошо видно, что в верхней части интервала (примерно 2623–2637 м) наблюдается контрастное рассогласование графиков, что указывает на наличие уверенно выделяемой по

данным ГИС зоны АВПД. Её мощность составляет порядка 20 м. Характеризуя полученные данные, можно сказать следующее.

1. Поскольку в разрезе, содержащем коллекторы, распределение физических параметров обычно носит весьма сложный характер, используемые данные необходимо нормализовать. При этом исключение из комплекса каких-либо данных приводит к снижению (иногда довольно значительному) достоверности прогноза. Именно поэтому часто происходит пропуск зон АВПД при анализе данных ГИС. Причиной этого может являться нехватка информации.

2. Достаточно часто зоны аномально высокого пластового давления сопровождаются нарушенным поведением физических параметров, что выражается в повышении удельного электрического сопротивления, понижении радиоактивности и самопроизвольной поляризации. Причиной таких изменений могут являться области развития наложенной карбонатизации, которые, в случае наличия в разрезе, меняют ГК и ПС так же, как и зоны АВПД, но совершенно другое влияние оказывают на водородосодержание и сопротивление. Эта связь нуждается в дополнительных исследованиях, что не является задачей настоящей работы.

Картирование зон АВПД с использованием атрибутного анализа сейсмических данных

Как для прогноза наличия или отсутствия зон АВПД, так и для оценки их глубины залегания сегодня активно используют сейморазведочные данные. Эффективность этого подхода считается доказанной, в том числе и в условиях отсутствия скважин, что делает невозможным использование данных ГИС. Это позволяет уменьшить вероятность техногенных инцидентов, обусловленных аномально высоким пластовым давлением при бурении скважин.

В качестве эталонных нами использовались материалы по газоконденсатному Мыльджинскому месторождению, характеризующемуся сравнительно крупными запасами углеводородов на фоне сложного геологического строения. Для геологического разреза объекта свойственно наличие тектонических дислокаций в осадочном чехле, рапопроявлений и, как следствие, развитие во флюидных системах «раппа/газ» аномально высоких пластовых давлений. Эти зоны расположены чаще всего в центральной части разреза.

Физико-геологические основы использования сейсмических атрибутов для прогнозирования зон АВПД. Поскольку природу формирования зон АВПД, как правило, связывают с процессами уплотнения глин в ходе осадконакопления, то вполне естественным является то, что для их успешного прогнозирования по геофизическим данным необходимо понимание особенностей распределения свойств глин, связанных именно с процессами осадконакопления, в том числе их изменений на этапе уплотнения глин. Одним из основных индикаторов будет являться изменение скоростей упругих волн относительно «чистых» глин. Именно это даёт возможность использования сейморазведочных данных для достоверного прогноза зон АВПД. При этом надо иметь в виду, что изменение скоростей пробега упругих волн может быть обусловлено и другими причинами, никак не связанными с процессами уплотнения глин.

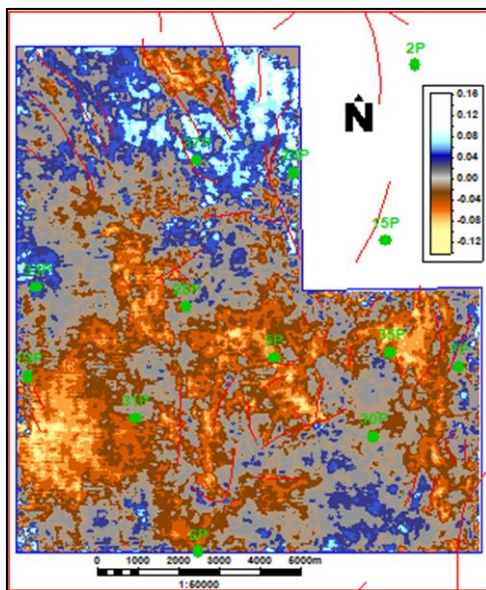
Поскольку вышеприведённые соображения говорят о том, что наиболее уверенно зоны аномально высокого пластового давления характеризуются значительным повышением пористости, температуры, а также значений коэффициента Пуассона на фоне снижения амплитуд интервальных скоростей, а также значений эффективного напряжения и объёмной плотности, наиболее эффективными для прогнозирования зон АВПД можно считать следующие сейсмические атрибуты: относительный акустический импеданс (Relative Acoustic Impedance, RAI), пороговое значение амплитуды (Threshold value), затухание амплитуды атрибута t^* (Attenuation), атрибуты преобразования Гильберта. Более подробно рассмотрим **затухание амплитуды атрибута t^* (Attenuation)**. Этот атрибут основан на изучении особенностей затухания частоты сигнала в окне и разработан как средство для определения трещиноватых зон в сейсмическом кубе. Исследователями было предположено, что затухание амплитуды определяется прежде всего вертикальной мощностью трещиноватой зоны и плотностью трещин в кубе в целом. При прохождении через зоны трещиноватости в сейсмическом сигнале отмечается подавление высоких частот. Поэтому в спектре сигнала выше и ниже трещиноватой зоны наблюдается уверенно выделяемый сдвиг высоких частот

относительно низких. При этом в случае, если флюид представлен газом, поглощаться будут высокие частоты, а если жидкостью, то низкие.

Результаты расчёта, приведённые на рисунке 4.2, показывают возможность уверенного выделения повышено трещиноватой зоны по данным анализа особенностей структуры распространения **затухания амплитуды атрибута t^*** . При этом надо учитывать многофакторную природу АВПД, которая делает невозможным уверенный прогноз таких зон только по какому-то одному признаку и обуславливает настоятельную необходимость использовать для их выделения набор признаков.

Наличие в разрезе зон аномально пластового давления неизбежно приводит к появлению локальных изменений интервальных скоростей сейсмических волн. В том числе меняются на глубину скорости ОГТ в случае повышения давления в сводовых частях структур. Поэтому вполне естественным является то обстоятельство, что при определении удельного веса бурового раствора уже давно используется анализ именно интервальных скоростей. Конечно, подобная взаимосвязь является в определённой степени упрощением, т. к. изменения свойств пород под зоной АВПД будут зависеть и от других факторов, например от характеристик геологической среды.

Одним из вариантов количественной оценки связи между интервальными скоростями и аномальными изменениями пластового давления является расчёт соответствующих зависимостей, которые фактически дают представление о характере изменения скоростей ОГТ на глубину. В случае их использования признаком наличия зон АВПД в разрезе будет являться отрицательный градиент интервальных скоростей, появление которого связано с их уменьшением в кровле АВПД.



4.5. Выводы к 4 главе

1. В качестве каротажной основы для картирования зон АВПД необходимо использовать, в первую очередь, нормализованные данные БК, НГК и ПС. Полученный по результатам анализа каротажных данных прогноз будет являться наиболее достоверным. Использование каротажных данных для межскважинного прогноза путём их интерполяции является достаточно грубым инструментом, и к полученным результатам необходимо относиться с некоторой долей скепсиса.

2. Наиболее достоверные результаты для прогноза зон АВПД как в межскважинном пространстве, так и в случае их отсутствия можно получить при использовании сейсморазведочных материалов. При этом весьма желательной частью процедуры является

«калибровка» результатов прогноза на материалы ГИС, а также процесс прогноза требует привлечения априорной информации о геологическом строении площади.

3. Полученные при формировании прогноза по сейсморазведочным материалам (как, впрочем, и по данным ГИС) зависимости являются локальными, т. е. их применимость, как правило, ограничена только площадью работ. Одной из причин этого является локальность литологии. При необходимости экстраполяции результатов на другие площади необходима перекалибровка полученных ранее зависимостей при общем сохранении методики анализа.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Проведённое исследование на тему *«Возможности сейсмических атрибутов для прогнозирования и изучения состояния трещиноватых коллекторов на примере месторождений углеводородов Западной Сибири»* позволило сделать следующие выводы.

Для прогнозирования трещиноватости на сегодняшний день используется несколько дополняющих друг друга методик.

1. Наиболее достоверные результаты получаются при использовании материалов ГИС. При этом конкретный набор методов, включаемых в комплекс, зависит от конкретных задач и геологических условий при обязательном комплексировании имеющихся данных. Данные, полученные при проведении исследований комплексом, в состав которого чаще всего включаются гамма-каротаж, нейтронный каротаж, плотностной гамма-гамма каротаж и акустический каротаж, чаще анализируются на качественном уровне, как средство обнаружения коллекторов, зон дробления, трещиноватости, характеристики типа пустотного пространства. Однако при определённых условиях используется и количественный анализ каротажных данных.

2. Современные методы для выделения трещин компании «Шлюмберже». Для достоверной качественной и количественной интерпретации нужны специальные методы ГИС: Micro-Scanner и Sonic Scanner. Применение микросканера позволяет картировать непосредственно трещины, с которыми, собственно говоря, и связана фильтрация углеводородов. А вот геометрические характеристики трещиноватости изучаются уже с помощью ультразвукового сканера.

3. Для исследований за пределами скважин (или в их отсутствии) применяются данные сейсмических методов, использующих отражённые волны. Как весьма высокая оценивается эффективность сейсморазведки в случае изучения поровых коллекторов, в то время как для трещинно-кавернозных коллекторов стандартные методы анализа сейсморазведочных данных не подходят. Это связано с особенностями поведения волны в условиях трещинно-кавернозного разреза. В этом случае чаще всего формируются дифрагированные волны, а вот отражённые – далеко не всегда.

Решение проблемы повышения эффективности применения сейсморазведки в этих условиях видится нами прежде всего в использовании при интерпретации данных технологий атрибутного анализа. При этом каждый из атрибутов подчёркивает определённую характеристику волнового поля, связанную с трещинами.

Необходимо иметь в виду, что, по самым разным причинам, распределение трещиноватости в геологической среде, как правило, является весьма сложным, однако отнюдь не хаотическим. Причины этого связаны с неоднородностью литологического состава, наличием в горной среде самых разных очагов напряжений, некоторые из которых имеют геологический генезис, а некоторые – техногенный. Соответственно, возникающая интегральная картина напряжений не только является сложной, но и не постоянна во времени, что, в первую очередь, связано с техногенными очагами. Тем не менее, определённые закономерности распределения напряжений существуют, что позволяет с той или иной степенью уверенности выделять локальные составляющие напряжений.

Результаты проведённых исследований, позволившие обосновать 1-е защищаемое положение:

Изучение трещинных и трещинно-кавернозных коллекторов вызывает ряд острых и проблемных вопросов. Этому служит целый ряд причин: сложная структура пустотного

пространства (основная масса коллекторов нефтегазоносного комплекса имеет комбинированный тип ёмкости – от трещинно-порового до трещинно-кавернозного и т. д.). Осложняет задачу изучения трещинно-кавернозных коллекторов и широкое распространение аномально высоких пластовых давлений.

Ещё одной проблемой, требующей дополнительного изучения для условий трещинных коллекторов, являются вопросы миграции флюида по трещинам. Однако вопросы влияния трещиноватости на запасы и технологию извлечения углеводородов пока изучены слабо.

В своей работе мы исследовали связь систем аномально высокого пластового давления с сейсмическими атрибутами, а также элементами геологического строения, что позволило обосновать первое защищаемое положение, в котором мы доказываем наличие связи между АВПД и динамическими процессами, имевшими место в процессе формирования территории.

Нами показана значимая связь флюидодинамических процессов с формированием залежей углеводородов, а также их влияние на особенности размещения последних.

К числу нерешённых задач, требующих дальнейших исследований, относятся проблемы исследований трещиноватых зон и повышение вероятности достоверного прогноза зон АВПД.

Результаты проведённых исследований, позволившие обосновать 2-е защищаемое положение:

В ходе работы в пределах площади была использована технология FSF (Form Similarity Function) по следующим сейсмическим кубам: когерентности (атрибуты Coh_disp, Coh_min, Coh_max).

Методы атрибутного анализа допускают большое разнообразие в интуитивно понятных настройках алгоритма классификации, поэтому рассмотрим их более подробно. Когда уже существует множество реализаций расчёта сейсмического атрибута, следующий этап анализа состоит в выборе для него меры сходства между множеством многомерных точек в признаковом пространстве и имеющимися результатами интерпретации ГИС разведочных и эксплуатационных скважин. Наиболее распространённый вариант – это линейное или Евклидово расстояния, для дополнительного учёта корреляционных связей между компонентами многомерного индикатора рассматривается также расстояние.

Отдельного внимания заслуживают также меры близости, позволяющие вводить свои пороги сходства и информационные веса для различных компонент. При изучении внутренней структуры коллекторов, прогноза фильтрационно-емкостных свойств и характера нефтенасыщения существует много перспективных объектов, для которых необходимо решать задачи оптимального размещения скважин с целью подтверждения залежей и оценки нефтеперспектив неразбуренной части месторождения, выявления коллекторов и определения характера их насыщения в широком диапазоне глубин и при резкой изменчивости геологической модели по латерали, где допускается пространственное изменение формы импульсов. В таких условиях необходим комплексный последовательный подход к совместной интерпретации данных сейсморазведки, а также применение современных алгоритмов и технологий прогноза петрофизических свойств, отличительной чертой которых является способность максимального учёта разнородной априорной геолого-геофизической информации и создание объёмных лито-фациальных и петрофизических моделей.

Изменчивость формы может быть оценена по одной из известных величин: коэффициент корреляции Пирсона, Евклидово расстояние и Манхэттенское расстояние и т. п. Анализ этих величин привёл к созданию нового сейсмического атрибута, на основе которого можно проводить оценки вероятности распространения лито-фациальных условий или петрофизических характеристик – FSF (Form Similarity Function), характеристика которого приведена в Главе 2.

Учитывая большую площадь исследуемого участка и сложную структуру перспективных объектов, необходимо признать невозможность использования методик, опирающихся на модели однородных и изотропных сред. Описание взаимосвязи различных факторов с помощью линейных уравнений в этом случае приведёт к значительным ошибкам прогнозирования. Поэтому корреляционные связи должны описываться в общем случае трёхмерными

зависимостями либо изучаться латерально вдоль целевых пластов и описываться двумерными вероятностными зависимостями. Такая технология использована при выполнении данных работ. Она основана на анализе изменчивости формы сейсмического поля и его атрибутов. Форма отражённой волны (атрибут FSF – Form Similarity Function), извлеченная из сейсмической записи, несёт в себе интегральную характеристику породно-слоевых ассоциаций геологической среды. Соответственно, изменение формы волны по вертикали и латерали, с сейсмической точки зрения, должно отражать смену бассейновых и фациальных обстановок, свидетельствовать о пространственном положении и **интенсивности развития тектонической трещиноватости**, устанавливать границы неоднородностей внутри кристаллического фундамента, представляющего собой монолитно-гетерогенную среду, в противоположность осадочным толщам, где доминируют регулярно-слоистые толщи.

Результаты проведённых исследований, позволившие обосновать 3-е защищаемое положение:

Нами исследованы возможности использования статистических методов как средства для формирования оптимального комплекса сейсмических атрибутов, применение которых позволяет эффективно решать проблемы прогнозирования трещинно-кавернозных коллекторов.

Рост количества разнообразных сейсмических атрибутов и их разнообразных модификаций имеет под собой вполне объективные причины, связанные со сравнительно малым практическим опытом применения атрибутного анализа для решения задач прогнозирования трещиноватости на фоне отсутствия каких-либо разработанных критериев их выбора и комплексирования. К таким же причинам относится и многофакторность связи между характеристиками сейсмического сигнала и параметрами геологической среды. В ряде случаев (на наш взгляд, необоснованно) для решения этих задач пытаются использовать весьма изощрённые статистические подходы, что часто приводит к совершенно необъяснимым с геологической точки зрения результатам.

В то же время сама проблема выбора оптимального набора атрибутов существует и, более того, весьма значима при проектировании разработки месторождения. Нами предложено сочетание альтернативных подходов к прогнозу ФЕС коллекторов по сейсморазведочным данным, объединяющее методы анализа, в основе которых лежит математический аппарат, позволяющий одновременно использовать некоторое множество атрибутов для поиска связей между ними и параметрами разреза и прямой прогноз, формируемый исходя из априорной информации о свойствах среды.

Был выполнен канонический анализ по данным ФЕС и СА, а также была определена степень влияния СА на ФЕС. Полученные данные важны для адекватного построения трёхмерной геологической модели (определение тренда для стохастического моделирования).

Получаемая в результате такого анализа информация, содержащая данные о трещиноватости, которые включают в себя её геометрические характеристики, позволяет рассчитывать траектории бурения таким образом, чтобы, при необходимости, коллектор был пересечён в нужной точке, а в случае прогнозирования зон АВПД – их пересечения можно было бы либо избежать, либо контролировать. Наши данные показывают, что в сейсмическом сигнале отражение находят лишь системы трещин. Разрешающей способности существующих методов для картирования одиночных трещин на сегодняшний день не хватает.

Получаемые в результате применения предлагаемой методики данные не только позволяют оптимизировать бурение за счёт оценки положения коридоров трещиноватости, но и являются значимыми в случае наличия газовых шапок, формирующих единую гидродинамическую систему.

Таким образом, предложенная нами технология совершенствования атрибутного анализа является одним из элементов повышения эффективности сейсморазведочных работ в целом. Она позволяет применять современные методы анализа данных и извлекать большее количество информации из материалов современных высококачественных съёмок.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

Публикации в ведущих изданиях согласно перечню ВАК

1. Орехов, А. Н. Возможности геофизических методов для прогнозирования трещиноватости коллекторов / А. Н. Орехов, **Амани Мангуа Марк М.** // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 6. – С. 198–209.

2. Орехов, А. Н. Информативность геометрических атрибутов для прогнозирования трещиноватости коллекторов на примере месторождения углеводородов Томской области / А. Н. Орехов, **Амани Мангуа Марк М.** // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 9. – С. 230–238.

3. Орехов, А. Н. Изучение зон аномального пластового давления с помощью анализа атрибутов сейсмических полей на примере месторождения Западной Сибири / А. Н. Орехов, **Амани Мангуа Марк М.** // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 331. – № 5. – С. 46–56.

Публикации в изданиях, индексируемых в международной базе данных SCOPUS

4. Шестаков, В. В. Применение метода «двойного крайгинга» при построении объёмных петрофизических моделей / Г. А. Сысолятина, В. В. Шестаков, Д. Ю. Степанов, **Амани Мангуа Марк М.** // Conference Proceedings, GeoBaikal 2018. P. 1–6. URL: <http://earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=93698>.

5. **Amani, M. M. M.** Complex data analysis as a tool for removing uncertainties during construction seismofacial model of the Upper part of the productive horizon Yu1 Luginetsky deposits / **M. M. M. Amani**, A. I. Evdokimova // Conference proceedings, Geomodel 2020. P. 1–5. URL: <https://www.earthdoc.org/content/papers/10.3997/2214-4609.202050040>.

Публикации в других изданиях

6. **Амани, М. М.** Проблемы при проектировании пространственной съёмки для картирования строения палеозоя по сейсмическим данным / **Амани Мангуа Марк М.**, И. В. Парубенко, Д. Ю. Степанов, Г. И. Резяпов // Труды XXI Международного симпозиума имени академика М. А. Усова студентов и молодых учёных, посвящённого 130-летию со дня рождения профессора М. И. Кучина. – Томск, 2017. – С. 342–344.

7. **Амани, М. М. М.** Применение методов геостатистики в факторно-регрессионном прогнозировании пористости коллекторов по сейсмическим атрибутам / **Амани Мангуа Марк М.**, О. В. Стукач // Молодёжь и современные информационные технологии: Сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. Томск: Изд-во ТПУ, 2019. – С. 156–157.

Соискатель *Амани Мангуа* /АМАНИ Мангуа Марк М./

Подписано к печати 02.12.2021. Формат 60х84/16. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 1,51. Уч.-изд. л. 1,37.
Заказ 230-21. Тираж 100 экз.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ