

На правах рукописи



КОЗЯЕВ АНДРЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ВЫДЕЛЕНИЕ ПОВЫШЕННОЙ КАВЕРНОЗНОСТИ В
КАРБОНАТНЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ПУТЕМ
КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ДАННЫХ ГИС И
АЗИМУТАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯННЫХ
СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН НА ПРИМЕРЕ РИФЕЙСКОГО
КОЛЛЕКТОРА ЮРУБЧЕНО-ТОХОМСКОГО
МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

1.6.9 – Геофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Новосибирск - 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет», Институт нефти и газа.

Научный руководитель:

Поздняков Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор, заслуженный геолог РФ

Официальные оппоненты:

Троян Владимир Николаевич, доктор физико-математических наук, Санкт-Петербургский государственный университет, профессор кафедры физики Земли (г. Санкт-Петербург);

Смирнов Максим Юрьевич, кандидат геолого-минералогических наук, ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский геологический нефтяной институт», заместитель генерального директора по геофизике (г. Москва).

Ведущая организация:

Акционерное общество «**Институт геологии и разработки горючих ископаемых**» (г. Москва).

Защита состоится 10 марта 2022 г. в 15 час. на заседании диссертационного совета 24.1.087.02 (Д 003.068.03) на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН), в конференц-зале.

Отзыв в двух экземплярах, оформленный в соответствии с требованиями Минобрнауки России (см. вклейку), просим направлять по адресу:

630090, г. Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3,

факс 8(383) 330-28-07,

e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ИНГГ СО РАН <http://www.ipgg.sbras.ru/ru/education/theses/d003-068-03/kozaev2021>.

Автореферат разослан 21 января 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор геол.-мин. наук., доцент
8(383)3331639



Неведрова
Нина Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Объект исследования – карбонатные осадочные горные породы на предмет разработки методики выделения в них зон повышенной кавернзности.

Актуальность исследования

Как известно, к карбонатным породам приурочено 57% мировых разведанных запасов углеводородов [Stoakes, 1994]. Накопленный опыт геологоразведки и разработки карбонатных отложений говорит о неравномерности распределения коллектора и фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) в таких объектах [Закревский, 2016]. Неоднородность строения приводит к тому, что, зачастую, небольшая часть скважин месторождения даёт наибольший вклад в добычу. Как правило, наиболее продуктивные скважины вскрывают зоны повышенной кавернзности или трещиноватости, характеризующиеся увеличенной пустотностью и проницаемостью по отношению к вмещающим породам.

Известные методики прогноза повышенной кавернзности не удовлетворяют возрастающим требованиям нефтяных компаний, стремящихся к повышению эффективности геологоразведки и освоения месторождений нефти и газа. Поэтому необходимо разработать более совершенные подходы с учетом достижений в разных областях знания и накопленного опыта. Из-за истощения традиционных запасов нефти, приуроченных к терригенным породам с гранулярной пористостью, растёт количество разрабатываемых месторождений с карбонатным трещинно-каверновым коллектором, следовательно, изучение методов выделения повышенной кавернзности актуально как сегодня, так и в ближайшем будущем.

Рифейский коллектор Юрубчено-Тохомского месторождения (ЮТМ) характеризуется крайней анизотропией и гетерогенностью [Козяев и др., 2016]: зачастую скважины, расположенные в нескольких сотнях метров друг от друга, существенно отличаются по своим добычным характеристикам [Н.М. Кутукова, 2019]. Это объясняется тем, что эффективное пустотное пространство рифейского коллектора сформировано под влиянием вторичных процессов, протекавших во время предвендского перерыва [Битнер и др., 1990], и имеет многокомпонентный состав (каверны, трещины и т.д.). Эффективность разработки ЮТМ в значительной степени зависит от того, насколько корректно удастся построить геологическую модель этого уникального месторождения.

Каждая из составляющих пустотного пространства коллектора ЮТМ имеет свои особенности распределения в пространстве и по-своему влияет на результаты добычи. За последние несколько лет коллективом

геологов ООО «РН-КрасноярскНИПИнефть» и АО «Востсибнефтегаз» выявлен новый компонент пустотного пространства рифейского коллектора ЮТМ – интервалы повышенной кавернозности. Данные интервалы обладают относительно повышенной ёмкостью и проницаемостью – их распределение в резервуаре значительно влияет на добычные характеристики скважин. Используемая в практике геолого-геофизическая модель месторождения [Трифонов, 2016] не учитывает их влияние, что может привести к выбору неоптимальной стратегии разработки объекта и, как результат – экономическим потерям.

Учитывая значительный объём инвестиций, необходимый для полномасштабной эксплуатации Юрубчено-Тохомского месторождения, и высокие геологические риски (анизотропия и гетерогенность коллектора), разработка методики выделения и прогнозирования повышенной кавернозности, а также оценка их влияния на добычу, актуальна.

Цель исследования – обеспечить геологическое обоснование оптимального освоения месторождений углеводородов, приуроченных к карбонатным породам, путем создания и внедрения методики выделения зон повышенной кавернозности карбонатных отложений по данным ГИС и 3D сейсморазведки на основе построения азимутального распределения рассеянных волн.

Научные задачи

1. Определить роль повышенной кавернозности в освоении пробуренных эксплуатационных скважин;
2. Разработать методику выделения повышенной кавернозности карбонатных отложений на основе комплексирования данных ГИС и 3D сейсморазведки.

Фактические материалы, методы исследования и программно-алгоритмические средства

Фактическим материалом для исследования служит база геолого-геофизических данных, полученная за период с 1995 по 2019 гг. при изучении уникального Юрубчено-Тохомского нефтегазоконденсатного месторождения специалистами многих организаций (АО «Востсибнефтегаз», ООО «РН-КрасноярскНИПИнефть» и др.). Используются данные ГИС, результаты исследования керна и гидродинамических исследований по 104 скважинам. Также используются данные 3D сейсморазведки, полученные на площади 3124 км² в период с 1995 по 2015 гг.

Основной метод исследования – статистический анализ геолого-геофизической информации, в частности – корреляционный анализ. Также используется метод численного моделирования волновых полей

конечно-разностным методом, разработанный в Институте нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, основанный на локальном пространственно-временном измельчении сетки в области скопления мелкомасштабных неоднородностей [Лисица, 2017].

Кроме того, для решения поставленных задач в процессе исследования использовались следующие методы аналогии и сопоставление разномасштабной геолого-геофизической информации.

Защищаемые научные результаты

1. Разработана методика выделения зон повышенной кавернозности в карбонатном коллекторе, путём комплексирования данных ГИС и 3D сейсморазведки. На основании результатов численного моделирования волновых полей и опробования на Юрубчено-Тохомском месторождении показано, что применение азимутальных и энергетических характеристик рассеянных сейсмических волн позволяет выполнять количественный прогноз кавернозности и отделять её влияние от трещиноватости;

2. Анализ показателей эксплуатации скважин изучаемого месторождения, доказывает влияние повышенной кавернозности на характеристики разработки нефтегазоконденсатных месторождений, такие как обводнённость и газовый фактор, что свидетельствует о необходимости использования разработанной методики для достижения оптимального освоения месторождений углеводородов, приуроченных к карбонатным породам.

Личный вклад соискателя

Выполнено численное моделирование и разработана методика выделения зон повышенной кавернозности карбонатных отложений на основе комплексирования данных ГИС и 3D сейсморазведки;

Разработанная соискателем методика использовалась при выполнении прогноза распространения кавернозности в рифейском резервуаре Юрубчено-Тохомского месторождения. Для этого, с применением реальных геолого-геофизических данных с месторождения, была проведена интерпретация ГИС, обработка и интерпретация данных 3D сейсморазведки, а также анализ показателей разработки на месторождении.

Соискатель принимал участие на каждом этапе исследования: в постановке задачи, обсуждении и подготовке публикаций по теме диссертации. Разработал методические подходы решения задачи, выполнил интерпретацию данных ГИС, обработку и интерпретацию данных 3D сейсморазведки и анализ результатов эксплуатации.

Научная новизна работы

1. В результате численного моделирования установлено, что наличие повышенной кавернозности приводит к возникновению интенсивных рассеянных волн с аспектным соотношением рассеяния, близким к единице;

2. С использованием разработанной методики выполнен количественный прогноз доли кавернозных интервалов в разрезе карбонатных отложений с трещинно-каверновым типом коллектора. Основным преимуществом здесь является возможность разделения кавернозного и трещинного типа коллекторов по данным 3D сейсморазведки. Знание аспектного соотношения позволяет определить долю каждой из компонент (трещины и каверны) в пустотном пространстве. Этот факт имеет принципиальное значение на этапе разработки месторождения, так как показатели разработки для чисто трещинного и каверно-трещинного коллектора могут отличаться на порядок;

3. Установлена качественная связь между наличием повышенной кавернозности в разрезе и стартовыми показателями газового фактора и обводнённости, а также динамикой их роста: при вскрытии повышенной кавернозности газовый фактор и обводнённость ниже по отношению к зонам без повышенной кавернозности;

4. Определена взаимосвязь максимальной ёмкости интервалов повышенной кавернозности, определенных по ГИС, и дебитом жидкости, установленным по результатам испытаний скважин. Связь количественная, линейная, прямо пропорциональная: увеличение максимальной ёмкости интервалов повышенной кавернозности ведёт к росту дебита жидкости. Относительно невысокий коэффициентом корреляции (0.75) обусловлен влиянием ряда других компонентов пустотного пространства рифейского коллектора (трещины, поры и т.д.).

Практическая значимость результатов исследования

1. Разработанная методика позволяет выделять интервалы повышенной кавернозности карбонатного коллектора при наличии набора разномасштабной информации, включающего в себя: стандартные данные 3D сейсморазведки и результаты записи пластовых микросканеров (ГИС);

2. На примере ЮТМ обоснована взаимосвязь между повышенной кавернозностью и показателями разработки месторождения. Поскольку повышенная кавернозность значительно влияет на технологические показатели эксплуатации скважин, а именно – снижает стартовые показатели и динамику роста газового фактора и обводнённости, то проектирование разработки с учётом выделенных

интервалов повышенной кавернозности повысит эффективность освоения месторождения;

3. Показано, что использование разработанной методики выделения зон повышенной кавернозности позволит снизить неопределенности в геолого-технологических моделях месторождений, что, в свою очередь, повысит достоверность прогноза добычи и позволит выбрать наиболее рациональный вариант разработки месторождения. Что, как правило, положительно влияет на экономику проектов, повышая чистый дисконтированный доход (ЧДД) от их реализации;

4. Разработка расширяет перечень методик обработки и интерпретации данных сейсморазведки и направлена на повышение ее информативности. Разработанную методику предлагается использовать для изучения месторождений с карбонатным трещинно-каверновым резервуаром. Доля таких месторождений в мире составляет примерно 57%, а их значение для отрасли возрастает с каждым годом по причине сокращения количества месторождений с традиционным терригенным поровым коллектором.

Апробация результатов исследования

Предложенная методика успешно опробована в рамках одного из производственных проектов ООО «РН-КрасноярскНИПИнефть» в 2017-2018 гг. В настоящее время полученные результаты используются при построении геологической модели месторождения и для геологического сопровождения бурения.

Результаты исследования были апробированы на конференциях различного уровня:

- 17-я научно-практическая конференция EAGE по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа «Геомодель 2015» (Геленджик, 2015);

- 7-я Российская нефтегазовая техническая конференция и выставка SPE (Москва, 2016);

- 19-я научно-практическая конференция EAGE по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа «Геомодель 2017» (Геленджик, 2017);

- третья тематическая конференция ЕАГО «Карбонатные резервуары - 2017» (Москва, 2017);

- технологическая конференция компании ПАО «НК «Роснефть» - «Технологии в области разведки и добычи нефти» (Москва, 2018);

- 6-я научно-практическая конференция EAGE «Тюмень 2019» (Тюмень, 2019).

- 82-я международная научно-практическая конференция выставка EAGE annual (онлайн, 2020).

Публикации

По теме диссертации опубликовано четырнадцать статей в ведущих научных журналах, из них 6 в журналах, рекомендуемых Высшей аттестационной комиссией РФ:

- «Научно-технический вестник ОАО «НК «Роснефть» – 1 статья (2016 г.);
- «Технологии сейсморазведки» – 1 статья (2017 г.);
- «Нефтяное хозяйство» – 2 статьи (2017 и 2020 г.);
- «Технологии нефти и газа» – 2 статьи (2018 и 2019 г.).

Восемь статей по теме диссертации индексируются в базе данных Scopus.

Структура диссертации

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы (112 наименований). Текст иллюстрирован 76 рисунками, отражающими основные положения и результаты исследования.

Благодарности

Выполнение этой диссертационной работы было бы невозможно без помощи и доброжелательного отношения коллектива ООО «РН-КрасноярскНИПИнефть».

Автор выражает глубокую признательность своему научному руководителю д.т.н., профессору Владимиру Александровичу Позднякову, а также д.ф.-м.н., профессору Владимиру Альбертовичу Чеведе за ценные консультации при подготовке работы.

Автор благодарен д.ф.-м.н. Галине Витальевне Решетовой и д.ф.-м.н. Вадиму Викторовичу Лисице за расчет синтетических данных, использованных при создании методики, а также Дмитрию Анатольевичу Филатову и Владимиру Анатольевичу Колесову за помощь в интерпретации данных ГИС и керна.

Автор признателен своим коллегам Валерию Владимировичу Шиликову, к.ф.-м.н. Александру Алексеевичу Тузовскому, Денису Александровичу Петрову и Анатолию Николаевичу Бибику за терпение и неоценимую помощь в научной работе. Автор благодарен Валентине Илларионовне Самойловой за методические рекомендации и поддержку при подготовке диссертации.

Автор признателен д.ф.-м.н., профессору, заведующему кафедрой геофизики ИНиГ СФУ Валерию Михайловичу Киселеву за поддержку и помощь при подготовке диссертации.

Написание данной работы было бы невозможно без согласования недропользователя, поэтому отдельную благодарность автор выражает главному геологу АО «Востсибнефтегаз» Михаилу Викторовичу Панкову.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дано обоснование актуальности темы исследования, определен объект, приведены постановка цели и научная задача, указывается методологическая основа, перечислены научные результаты, определяется их новизна и личный вклад, практическая значимость, апробация результатов

В **главе 1**, имеющей обзорный характер, приводится информация об известных решениях поставленной научной задачи, анализируются их достоинства и недостатки. Изучение широкого перечня научных публикаций и нормативных документов позволило установить, что для выделения кавернзности и трещиноватости по данным сейсморазведки используются следующие методики обработки и интерпретации данных сейсморазведки:

- методика изучения анизотропии упругих сейсмических волн;
- группа методик, основанных на изучении рассеянной компоненты волнового поля;
- методика определения зон трещиноватости и кавернзности по информации о поглощении сейсмических волн;
- инверсионные преобразования (акустическая, упругая инверсия и т.д.);
- методики, основанные на изучении сейсмических атрибутов (геометрические атрибуты, спектральная декомпозиция и т.д.);
- различные классификации по форме трасс или по значениям сейсмических атрибутов.

В главе рассмотрены каждая из вышеперечисленных методик, даны примеры их применения для выделения кавернзности по данным сейсморазведки.

Все рассмотренные подходы ориентированы на совместное выделение как трещин, так и каверн по данным 3D сейсморазведки. Такой подход эффективен на разведочном этапе изучения недр, когда основная задача – открыть месторождение и оценить его запасы. Однако, для карбонатных отложений, на этапе разработки месторождения принципиально важно понимать структуру порового пространства – имеет ли резервуар двойную систему пористости и проницаемости или нет [Nelson R.A.2001]. Если же он имеет двойную систему фильтрации, то важно понимать характер распределения в пространстве трещиноватости и кавернзности. Структура пустотного пространства карбонатных отложений будет предопределять следующие важные показатели разработки: темпы отбора жидкости, коэффициент извлечения нефти, форму и радиус зоны дренирования и т.д. [Майдебор В.Н., 1980].

Именно невозможность отдельного прогноза кавернозности и трещиноватости по данным 3D сейсморазведки можно определить, как основной недостаток известных решений и как ключевое преимущество разработанной методики.

В главе 2 «Выделение повышенной кавернозности в рифейском коллекторе ЮТМ по данным ГИС» рассматриваются предпосылки, методика и результаты выделения интервалов повышенной кавернозности по данным ГИС. Описываемые в главе результаты получены с применением реальных данных исследования керна и ГИС скважин Юрубчено-Тохомского месторождения.

В первой части главы приводятся факторы, подтолкнувшие к изучению данного вопроса. Они включают в себя:

- использование на месторождении с 2006 г. технологии изолированного отбора керна, что позволило повысить вынос керна в целевом интервале (в среднем) с 50 до 95%. Прирост обеспечили самые разуплотнённые участки, вероятно связанные преимущественно с зонами повышенной кавернозности;

- опыт предшественников, сталкивавшихся с зонами повышенной кавернозности при изучении других частей Байкитской антеклизы, в частности сотрудников ООО «Славнефть-НПЦ» и Petrotel;

- первые результаты эксплуатации месторождения, говорящие о существовании разных типов коллектора, что проявляется в значительно различающихся между собой показателях эксплуатации скважин – дебите нефти, обводнённости и газовом факторе.

Вторая часть главы посвящена разработке методики выделения повышенной кавернозности по ГИС и анализу полученных результатов.

Наиболее точные результаты выделения интервалов повышенной кавернозности получены в результате интерпретации изображений пластовых микросканеров (UBI и FMI). Это связано с большей разрешающей способностью метода, в сравнении со стандартным комплексом ГИС, что подтверждается сопоставлением результатов интерпретации с керном (рисунок 1).

К сожалению, использовать данный метод можно только в скважинах, изученных пластовыми микросканерами и с отобранным керном вдоль всего интервала рифейских отложений, вскрытых скважиной. Необходимым требованиям удовлетворяют 11 скважин из используемых в работе. Поэтому для интерпретации остальных скважин использовалась отсечка по значениям общей пористости более 6%, обоснованная статистическим анализом данных керна и результатов интерпретации ГИС (РИГИС) (рисунок 2).

Проведено сопоставление двух использованных методов на качественном и количественном уровне. В результате, установлено, что интерпретация, полученная с применением пластовых микросканеров может быть использована для последующего построения модели и атрибутивного анализа, а интерпретация, выполненная по отсечке, носит качественный характер и может применяться только как индикатор вскрывает скважина повышенную кавернозность или нет. Эта информация использована при анализе влияния повышенной кавернозности на показатели разработки месторождения, поскольку для этого требуется максимально возможное количество скважин.

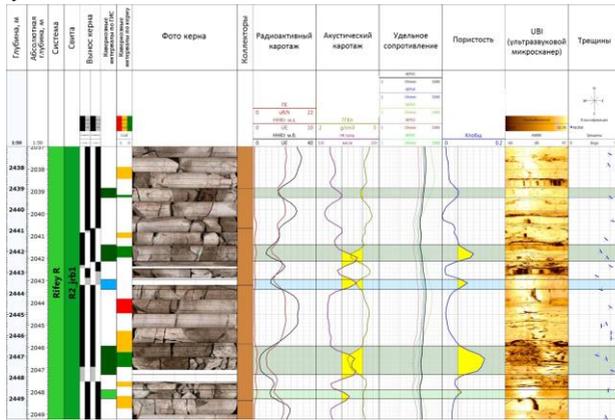


Рисунок 1 – Планшет с интерпретацией кавернозных интервалов по скв. 120_14_p, жёлтым выделены интервалы повышенной кавернозности выделенные по стандартным методам ГИС

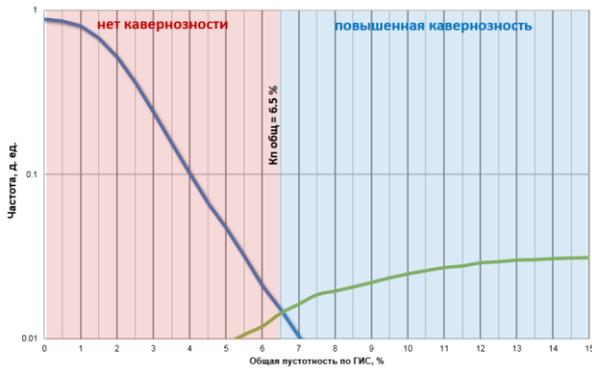


Рисунок 2 – Кумулятивные кривые распределения пористости для кавернозных и не кавернозных интервалов

В главе 3 «Оценка влияния повышенной кавернзности на результаты добычи» приведены результаты анализа влияния повышенной кавернзности рифейского коллектора на показатели разработки месторождения.

В первой части главы дано описание теоретических предпосылок влияния повышенной кавернзности на результаты освоения.

За основу для анализа взята классификация типов трещинных резервуаров, разработанная Р.А. Нельсоном в 1999 году [Nelson, 1999]. В работе систематизированы особенности геологического строения и разработки каждого из типов коллекторов по Р.А. Нельсону, основывающиеся на опыте изучения десятков месторождений по всему миру.

Далее важно было понять какое место занимает рифейский коллектор ЮТМ в классификации Р.А. Нельсона при наличии повышенной кавернзности и без неё. Определив типы трещинно-кавернового резервуара для каждой из ситуаций, можно использовать выявленные Р.А. Нельсоном закономерности для оценки поведения изучаемого резервуара ЮТМ.

В главе дано описание диагностических признаков разных типов коллекторов по Р.А. Нельсону. Учитывая текущую стадию изученности, наиболее эффективным для исследования ЮТМ является анализ графика K_n - $K_{пр}$ для всех скважин. Метод заключается в том, что проницаемость трещинного коллектора кубически зависит от раскрытости трещин, следовательно, незначительное увеличение раскрытости может привести к значительному увеличению проницаемости, без изменения пористости. При этом проницаемость кавернового и порового коллектора, как правило, линейно связана с пористостью [Добрынин, 2004].

Вторая часть главы посвящена обоснованию типов коллекторов рифейского резервуара ЮТМ. Чтобы понять, к какому из типов коллекторов, по Р.А. Нельсону, можно отнести коллектор ЮТМ при наличии или отсутствии повышенной кавернзности, построен похожий кросс-плот. Но по оси абсцисс отложена максимальная, а не средняя пористость (Рисунок 3), а по оси ординат отложен коэффициент продуктивности ($K_{прод}$). Максимальная эффективная пористость (в интервале испытания) используется как индикатор наличия повышенной кавернзности, поскольку ранее было установлено, что значения $K_{п.эфф} > 6\%$ связаны преимущественно с интервалами повышенной кавернзности.

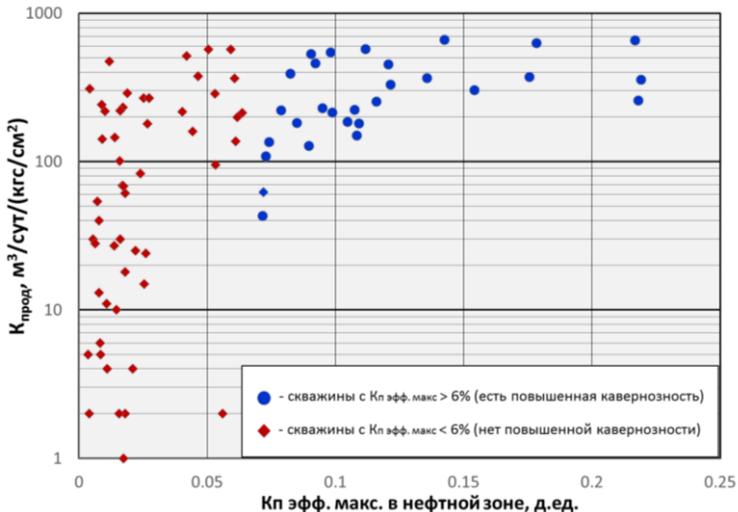


Рисунок 3 – Кросс-плот $K_{\text{прод}}$ – $K_{\text{п эфф макс}}$ в нефтяной зоне

Судя по графику можно предположить, что зоны, не вскрывающие повышенную кавернозность, относятся к чисто трещинному типу коллектора (I тип по Нельсону), поскольку одна и та же пористость соответствует значениям коэффициента продуктивности, отличающимся на несколько порядков. При этом зоны с интервалами повышенной кавернозности, вероятно относятся к III типу трещинно-каверновых резервуаров по Нельсону. Наблюдаемая линейная связь между коэффициентом продуктивности и максимальным коэффициентом пористости свидетельствует о том, что ФЕС кавернозных интервалов также влияют на продуктивные характеристики, что присуще только третьему типу

Чтобы оценить влияние повышенной кавернозности на обводнённость и газовый фактор (ГФ) построены соответствующие графики (Рисунок 4 и Рисунок 5) со средними показателями для каждой из групп скважин – вскрывающие повышенную кавернозность и не вскрывающие. Группы скважин соответствуют приведенным на Рисунок 3.

Опираясь на полученные данные, можно утверждать, что наличие в разрезе зон повышенной кавернозности приводит к снижению как стартовых значений обводнённости и ГФ, так и темпов их роста.

Различия в показаниях газового фактора менее однозначны из-за различий в толщинах газонасыщенных толщин на месторождении.

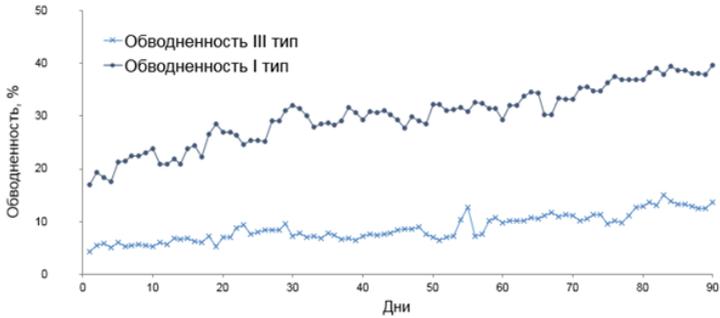


Рисунок 4 – Обводнённость для скважин с интервалами повышенной кавернозности (III тип) и без (I тип)

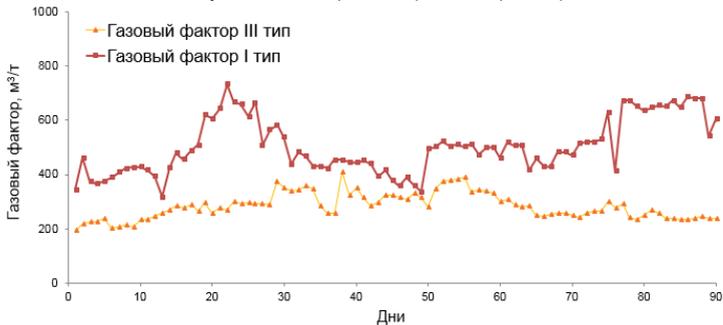


Рисунок 5 – Газовый фактор для скважин с интервалами повышенной кавернозности (III тип) и без (I тип)

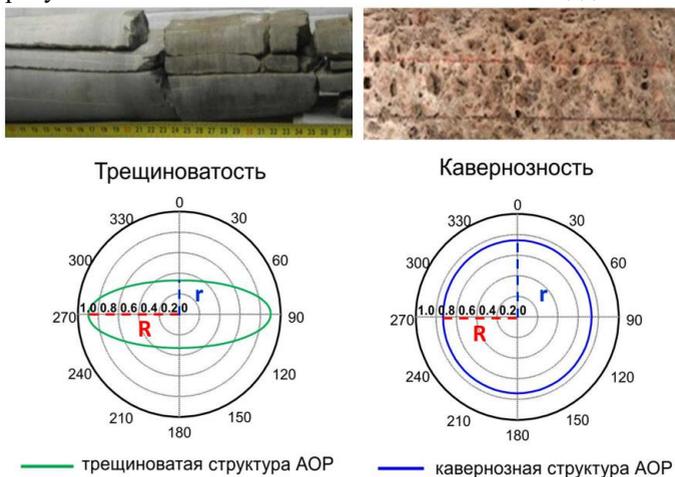
В главе 4 «Прогноз распространения повышенной кавернозности по данным 3D сейсморазведки» приводятся результаты численного моделирования, обосновывается методика выделения повышенной кавернозности по данным 3D сейсморазведки и демонстрируются результаты её использования.

В первой части главы дано описание выполненного трёхмерного, полноволнового сейсмического моделирования. Численное моделирование позволило установить, что наиболее эффективным инструментом для разделения энергии рассеянных волн на сформированную от скопления трещин и кавернозного пласта будет аспектное отношение рассеяния (АОР).

Аспектное отношение – это отношение короткой полуоси эллипса к длинной (Рисунок 6). На дифрагирующих объектах АОР есть отношение минимальной энергии рассеянных волн ($\Pi \text{ЭРВ}_{\min}(x,y,t)$) к максимальной ($\Pi \text{ЭРВ}_{\max}(x,y,t)$).

По результатам проведенного моделирования можно предположить, что $AOP \rightarrow 1$ означает, равенство радиусов эллипса по главной и второстепенной осям, т.е. амплитуды рассеяния на осях одинаковы, диаграмма является кругом, направленная трещиноватость отсутствует или имеется множество перпендикулярных трещин, что связано, скорее всего, с кавернозной структурой пустотного пространства. При $AOP \rightarrow 0$, диаграмма является эллипсом, что указывает на наличие доминирующего направления трещиноватости.

На Рисунок 6 представлена упрощенная схема методики, позволяющая понять её суть. Верхний ряд – изображение различных типов коллекторов рифея ЮТЗ в керне. Нижний ряд – типовые изображения формы эллипса и величины его площади. Таким образом, для зон направленной трещиноватости характерно низкое значение AOP и высокое значение площади эллипса (энергии). Зона кавернозности характеризуется повышенными значениями AOP и площади эллипса.



Аспектное отношение: $AOP = r/R$

Рисунок 6 – Типовые диаграммы AOP для разных структур пустотного пространства разреза протерозоя ЮТЗ

Во второй части главы описана методика прогноза повышенной кавернозности по данным 3D сейсморазведки.

Полученные результаты моделирования позволили определить параметры волнового поля, характеризующие распределение повышенной кавернозности – анизотропия и энергия рассеянных волн.

Методика прогноза повышенной кавернозности должна включать в себя оценку этих двух параметров и их грамотное комплексирование.

Для расчёта энергии рассеянных волн предлагается применять общепризнанный метод фокусирующих преобразований [Поздняков и др., 2009]. Данный метод подтвердил свою эффективность в условиях ЮТЗ в ходе многочисленных научных и практических работ [Поздняков и др., 2011].

Методология анализа анизотропии рассеянных волн основана на алгоритме азимутальной фокусировки рассеянных волн с ориентированными локальными апертурами предложенном к.ф.-м.н. Тузовским А.А. [Тузовский, А.А., 2005, 2011]. В представленной работе технология была доработана с целью определения параметра – аспектного отношения рассеяния (АОР).

Заключительная часть главы посвящена апробации технологии на реальных данных и выполнению прогноза повышенной кавернозности.

Для апробации технологии были использованы результаты интерпретации скважин, описанные в главе 2, и материалы сейсморазведки МОГТ-3D, полученные на Юрубченском ЛУ.

Параметры аспектное отношение рассеянных волн (АОР) и поле энергии рассеянных волн (ПЭРВ) были рассчитаны в виде 3D кубов сейсмических атрибутов. Значения для целевой, нефтегазонасыщенной части рифея получены в результате осреднения атрибутов в интервале 20 мс ниже кровли рифейского резервуара (эрозионной поверхности).

Для прогноза повышенной кавернозности в рифейском коллекторе ЮТМ, был получен комплексный атрибут, путём комбинирования средних значений АОР и ПЭРВ в целевом интервале (нормированный АОР). Результирующая карта несёт в себе информацию только об объектах, связанных с каверновой структурой пустотного пространства карбонатного коллектора.

На финальном этапе, для проверки связи между комплексным атрибутом нормированный АОР и характеристиками повышенной кавернозности, определенными по ГИС, был выполнен корреляционный анализ (Рисунок 8).

Наиболее кондиционный результат при корреляционном анализе дал параметр – доля повышенной кавернозности в разрезе, вскрытом скважиной (NTG). Вероятно, это связано с тем, что более простые параметры – общая толщина кавернозных интервалов, линейная ёмкость и т.д. зависят от общей толщины разреза рифея, вскрытого скважиной, которая изменяется от скважины к скважине по целому ряду причин.

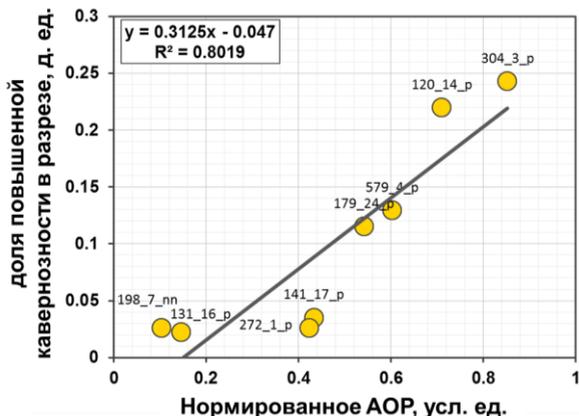


Рисунок 8 – Кросс-плот: AOP – NTG повышенной каверности

Между анализируемыми параметрами была установлена уверенная взаимосвязь с коэффициентом аппроксимации, равным 0.8 (Рисунок 8). Согласно методическим указаниям [Левянт и др., 2006], достоверность установленной статистической связи с таким коэффициентом аппроксимации и количеством скважин для анализа считается высокой. Следовательно, она может быть использована для прогноза.

Используя полученное уравнение регрессии и комплексный атрибут, нормированный AOP, был выполнен прогноз доли повышенной каверности в продуктивной части рифейского коллектора (Рисунок 9).

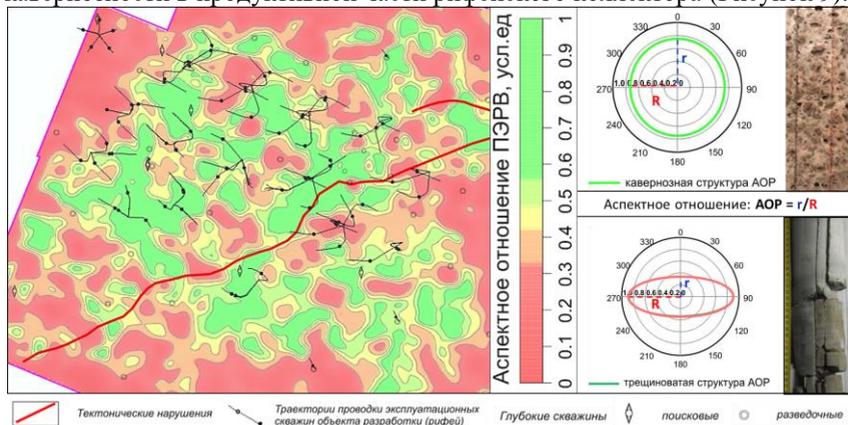


Рисунок 9 – прогнозная карта доли повышенной каверности в продуктивной части рифейского коллектора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований, в качестве нового методического подхода для интерпретации сейсмических данных предложена методика совместного анализа энергии и анизотропии энергии рассеянных волн, позволяющая количественно оценить вклад кавернозности и трещиноватости в структуру пустотного пространства, чего не удавалось достичь, используя другие известные на сегодня подходы. Разработка расширяет перечень методик обработки и интерпретации данных сейсморазведки и направлена на повышение ее информативности.

Разработанная методика апробирована на реальных данных полученных при изучении Юрубчено-Тохомского месторождения. При апробации использованы данные ГИС по 112 скважинам и материалы сейсморазведки МОГТ-3D, полученные на Юрубченском лицензионном участке на площади 3124 км².

Анализ связи зон повышенной кавернозности с показателями разработки пробуренных скважин позволил установить, что для оптимального освоения залежей нефти и газа, приуроченных к карбонатным породам с каверново-трещинным типом коллектора, необходимо руководствоваться приоритетом размещения скважин в зоны с повышенной кавернозностью для максимизации накопленной добычи нефти, используя прогнозную карту доли повышенной кавернозности в разрезе.

Перспективы дальнейшей разработки темы связаны с совершенствованием технологий расчёта используемых сейсмических параметров ПЭРВ и АОР, с целью повысить их разрешающую способность. Для этого может быть применён метода Гауссовых пучков.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

1. Козяев А.А. Подходы к моделированию карбонатного трещиноватого коллектора на примере месторождения Восточной Сибири / А.А. Козяев, Е.И. Смоленцев, А.Н. Бибик, К.Е. Закревский // Научно-технический вестник ОАО «НК «Роснефть». – 2016. – Вып. 42. – С. 11-15.
2. Гадыльшин К.Г. Оценка возможности выделения тонких кавернозных прослоев по рассеянным волнам в трещиноватом разрезе Юрубчено-Тохомского месторождения / К.Г. Гадыльшин, Д.Р. Колухин, В.В. Лисица, М.И. Протасов, Г.В. Решетова, Т.С. Хачкова, В.А. Чеверда, А.А. Козяев, В.А. Колесов, А.С. Мерзликина, В.В. Шиликов // Технологии сейсморазведки. – 2017. - №1. – С. 56 - 62.

3. Козяев А.А. Выявление зон улучшенных ФЕС в карбонатном каверново-трещинном коллекторе по рассеянной составляющей сейсмического волнового поля / А.А. Козяев, А.С. Мерзликina, Д.А. Петров, В.В. Шиликов, А.А. Тузовский, В.А. Черверда, А.С. Сорокин, Н.М. Кутукова, Р.С. Мельников // Нефтяное хозяйство. – 2017. – Вып. 1129. – С. 20-25.
4. Киселев В.М. Анализ систем естественной трещиноватости Юрубчено-Тохомского месторождения / В.М. Киселев, А.А. Козяев, А.В. Коротышева // Технологии нефти и газа. – 2018. – №6 (119). – С. 22-25.
5. Кутукова Н.М. Оптимизация системы разработки Юрубчено-Тохомского месторождения на основе концептуальной геологической модели / Н.М. Кутукова, М.В. Панков, А.С. Сорокин, А.А. Козяев // Технологии нефти и газа. – 2019 г. №6 (125). С. 57-67.
6. Тихонова К.А. Мультидисциплинарный подход к выделению и прогнозированию высокоёмких кавернозных зон в рифейском коллекторе Юрубчено-Тохомского месторождения / К.А. Тихонова, А.А. Козяев, Д.В. Назаров, С.К. Квачко, Е.А. Губина, Н.М. Кутукова // Нефтяное хозяйство. – 2020. Выпуск 1166. – С. 74-79.

Доклады на конференциях

7. Выделение кавернозных высокоёмких прослоев в рифейском коллекторе ЮТМ / Козяев А.А., Мерзликina А.С., Петров Д.А., Шиликов В.В., Тузовский А.А. // Geomodel 2017 – 19th Science and Applied Research Conference. Геленджик, 10-14 сентября, 2017 г.
8. Prognosis of High-Capacity Intervals of the Carbonate Reservoir by Analyzing the Seismic Scattering Energy / Petrov D.A., Kozyaev A.A., Melnik A.A., Tuzovskiy A.A., Shilikov V.V. and Merzlikina A.S. // Saint Petersburg 2018. – 2018. – 5 p.
9. Vuggy zone forecast through the integration of logging data and azimuthal characteristics of scattered seismic waves / Kozyaev A., Petrov D., Melnik A., Pozdnyakov V. and Kuznetsov M. // Tyumen 2019. – 2019.
10. Изучение характеристик системы естественной трещиноватости и кавернозности для оптимизации разработки карбонатного резервуара / Лихачев П.А., Козяев А.А. // Geomodel 2019 – 21th Science and Applied Research Conference. Геленджик – 2019.
11. New Methodic of Vuggy Zones Forecast for Carbonate Reservoir / Kozyaev A., Petrov D., Onuchin S., Ivanov G. // EAGE annual conference online – 2020.

Технический редактор Т.С. Курганова

Подписано в печать 25.11.2021

Формат 60x84/16. Бумага офсет №1. Гарнитура Таймс

Печ.л. 0,9. Тираж 75. Зак. № 202

ИНГГ СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3