

На правах рукописи



Скворцов Антон Андреевич

**РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ МЕТОДИКИ ВЫДЕЛЕНИЯ ПА-
ЛЕОКАРСТОВЫХ СТРУКТУР И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗОН ТРЕЩИ-
НОВАТОСТИ В ВЕРХНЕДЕВОНСКИХ ОТЛОЖЕНИЯХ ИЖМА-
ПЕЧОРСКОЙ ВПАДИНЫ**

**Специальность 25.00.16 - Горнопромышленная и нефтегазопромысловая
геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук**

Ухта 2015

Диссертация выполнена на кафедре геологии горючих и твердых полезных ископаемых ФГБОУ ВПО «Ухтинский государственный технический университет»

Научный руководитель: Кулешов Владислав Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Геологии горючих и твердых полезных ископаемых»

Официальные оппоненты: Грунис Евгений Борисович доктор геолого-минералогических наук, руководитель Дирекции по науке ОАО «Института геологии и разработки горючих ископаемых»

Хитров Алексей Михайлович, кандидат геолого-минералогических наук, заместитель директора по научной работе Института проблем нефти и газа Российской академии наук

Ведущая организация: Филиал ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в г. Ухта.

Защита состоится 21 апреля 2015 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета Д 212.291.01 в Ухтинском государственном техническом университете по адресу: 169300, Республика Коми, г. Ухта, ул. Первомайская, 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ухтинского государственного технического университета, а также на сайте вуза по адресу www.ugtu.net в разделе «Диссертации».

Автореферат разослан _____.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук,
профессор



Н.М. Уляшева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы.

Карбонатный тип коллектора является наиболее распространённым в мире. Статистика также указывает на то, что около 20-30% всех мировых извлекаемых запасов углеводородов относятся к отложениям, накопление которых предшествовало длительным перерывам в осадконакоплении (А. Флюгель, 2004). Установившиеся в течение таких перерывов гумидные условия являются благоприятным фактором для протекания процессов поверхностного карстообразования. Это в первую очередь связано с характерным избыточным увлажнением территории, которое формирует активные поверхностные стоки ручьев и рек, что способствует развитию эрозионных форм рельефа, в том числе карстовых полостей. При дальнейших сменах обстановок осадконакопления сформированные системы карстовых полостей подвергаются естественному погружению на современные глубины, что приводит к их разрушению в результате воздействия горного давления, создаваемого вышележащими породами. Зоны скопления погребённых обрушенных карстовых полостей называют системами палеокарстовых структур (Р. Д. Лукс, 2007). Внутри карстовых полостей при обрушении стенок формируются хаотичные брекчии различного размера. Несмотря на разрушение основных полостей, в этих зонах остаётся значительный объем пустотного пространства, кроме этого формируются дополнительные литогенетические трещины за счёт высвобождения геостатического напряжения вокруг полостей. Уплотнение брекчий внутри бывшей полости в ходе дальнейшего погружения территории часто сопровождается эпигенетическим минералообразованием, что приводит к сокращению объёма порового пространства и снижению проницаемости пород. Это приводит к формированию зон с пониженными фильтрационно-ёмкостными свойствами (ФЕС) в пределах карбонатного коллектора. В такой ситуации палеокарстовые системы могут оказывать существенное влияние на развитие неоднородности и расчленённости карбонатного коллектора. Поэтому очевидно, что тщательное и детальное изучение палеокарстовых систем является важным научным этапом при проведении геологоразведочных работ. Во избежание получения отрицательных результатов бурения, требуется выявлять зоны размещения палеокарстовых систем и связанной с ними трещиноватости, оценивать их влияние на коллекторские свойства, и учитывать полученную информацию на стадии проектирования разведочного и эксплуатационного бурения.

Учитывая вышесказанное, появилась необходимость разработать комплексную методику определения зон развития палеокарстовых структур и трещиноватости, основанную на комбинировании результатов керновых исследований, интерпретации комплекса геофизических исследований скважин (ГИС), сейсмических и промысловых данных.

Цель работы:

Разработка и внедрение новой комплексной методики выделения палеокарстовых структур и прогнозирования связанных с ними зон трещиноватости в верхнедевонских отложениях Ижма-Печорской впадины.

Основные задачи исследований:

1. Создание теоретической базы для разработки научно-обоснованной методики выделения палеокарстовых структур на примере литофациальной модели доманиково-сирачойских отложений.
2. Классификация геолого-геофизических параметров в разнофациальных доманиково-сирачойских отложениях района исследований.
3. Определение петрофизических характеристик палеокарстовых интервалов разрезов скважин исследуемой территории.
4. Разработка методики для выявления зон с благоприятными коллекторскими свойствами в пределах карбонатного массива палеокарстового типа с использованием данных 3D сейсмической инверсии и ортогональной декомпозиции.

Научная новизна

1. Доказано, что использование комплексной методики позволяет детализировать палеофациальную обстановку доманиково-сирачойского времени с выделением карбонатных построек, предрифовых и зарифовых фаций.
2. Обоснованы показатели акустической жёсткости отложений доманиково-сирачойского возраста, а также природа формирования кольцеобразных структур, выделенных по данным 3D сейсморазведки.
3. Установлены типовые параметры специальных методов ГИС для палеокарстовых интервалов с неблагоприятными коллекторскими свойствами, повышающие достоверность прогноза их развития в межскважинном пространстве с помощью сейсмической инверсии.

В диссертационной работе защищаются следующие положения:

1. Зоны позднедевонского карстообразования с характерными формами и структурами палеокарстового рельефа, а также распределение коллекторских свойств пород картируются сейсморазведкой 3D.
2. Значительные различия дебитов скважин на изучаемой площади обусловлены неравномерным заполнением пустотного пространства вторичными минералами, и продуктами обрушения кровли карстовых полостей на стадии эпигенеза пород.
3. Метод ортогональной декомпозиции позволяет выделять зоны трещиноватости в доманиково-сирачойских отложениях центральной части Ижма-Печорской впадины.
4. Разработанная методика комплексного изучения керна, ГИС, сейсмической инверсии, позволяет выделять, характеризовать и прогнозировать распространение, как распознаваемых при традиционном разрешении сейсмических данных (с помощью параметризации сейсмических данных), так и мелких (с помощью инверсии) палеокарстовых структур.

Практическая значимость работы

Разработанная методика изучения палеокарстовых структур будет использована для выделения и характеристики палеокарстовых структур на смежных территориях. Впервые для Тимано-Печорской провинции использована технология ортогональной декомпозиции сейсмических данных в комплексе с фактическими промысловыми данными, и с её помощью выделены зоны трещиноватости в доманиково-сирачойских отложениях. Результаты работы на изучаемой площади учтены профильными службами ООО «ЛУКОЙЛ-Коми» в рамках проектирования эксплуатационного бурения в пределах изучаемой площади.

Апробация работы

Основные положения и результаты работы докладывались на следующих научных конференциях: Севергеоэкотех (Ухта, 2009, 2010, 2012, 2014), Рассохинские чтения (Ухта, 2009, 2010, 2012, 2014, 2015), конференция молодых специалистов ООО «ЛУКОЙЛ-Коми» (Усинск, 2011, 2012), конференция AAPG Imperial Barrel Awards (Прага, 2013), преподавательская конференция УГТУ (Ухта, 2014), SPE Russian Oil & Gas Exploration & Production Technical Conference and Exhibition (Москва, 2014), геологическая конференция ОАО «ЛУКОЙЛ» (Москва, 2014).

Публикации

Автором опубликовано 10 статей: из них 2 в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией, 2 статьи размещены в изданиях, включенных в международную базу цитирования Scopus.

Структура и объём работы:

Диссертация состоит из введения, 4-х глав и заключения; содержит 138 страниц текста, 28 рисунков и 5 таблиц в тексте; библиографический список из 104 наименований.

Благодарности:

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю, доценту кафедры ГГиТПИ, кандидату технических наук В. Е. Кулешову.

Автор выражает благодарность за ценные консультации в ходе проведения исследований академику РАЕН, д.ф.-м.н., Кобрунову А. И., главному специалисту компании «Шлюмберже», д.т.н. Приезжеву И. И., заведующему кафедрой ГГиТПИ, к.г.-м.н. Ростовщикову В. Б. и профессору кафедры, д.г.-м.н. Пармузиной Л. В.

Существенную помощь в теоретических исследованиях и содействие в вопросах методологического характера оказали начальник отдела центра ресурсов и запасов УВ ООО «Газпром ВНИИГАЗ», к.г.-м.н., А. В. Мартынов, руководитель представительства ФГУП ВНИГРИ в г. Ухта к.г.-м.н. Б. П. Богданов и профессор департамента прикладной геологии Western Australian School of Mines К. Элдери, за что автор выражает им особую признательность.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава

В первой главе приводится аналитический обзор научно-технической литературы, касающейся геологического изучения района исследований, выделения палеокарстовых структур, а также обзор основных методов, предлагаемых для решения поставленных задач.

Основные аспекты геологического строения Ижма-Печорской впадины были детально изучены работами Кушнаревой Т. И., Снисарь Ф. Н., Иванова А. А., Беляковой Л. Т. и многими другими. Наиболее детальные модели строения и формирования органогенных построек на территории Тимано-Печорской провинции разрабатывались Беляевой Н. В., Богдановым Б. П., Жемчуговой В. А., Меннером В. В., Пармузиной Л. В., Соломатиным А. В., Фортунатовой Н. К., а также сотрудниками ОАО «Севергеофизика» (Ростовщиков В. Б. и др.). По результатам анализа и обобщения работ перечисленных авторов и фондовой литературы в данной главе приводится описание геологического строения района исследования и нефтегазоносности, которое включает в себя литолого-стратиграфическую характеристику разреза, особенности тектонического строения, изученность глубоким бурением, нефтегазоносность и сведения о разработке месторождения.

Палеокарстовые структуры, как в пределах исследуемого района, так и на смежных площадях, в разное время выделяли Мартынов А. В. (Рис.1), Карпюк Т. А., Петрова И. В., а также зарубежные авторы Р.Д. Лукс, Q. Dou, С. Sullivan и др.

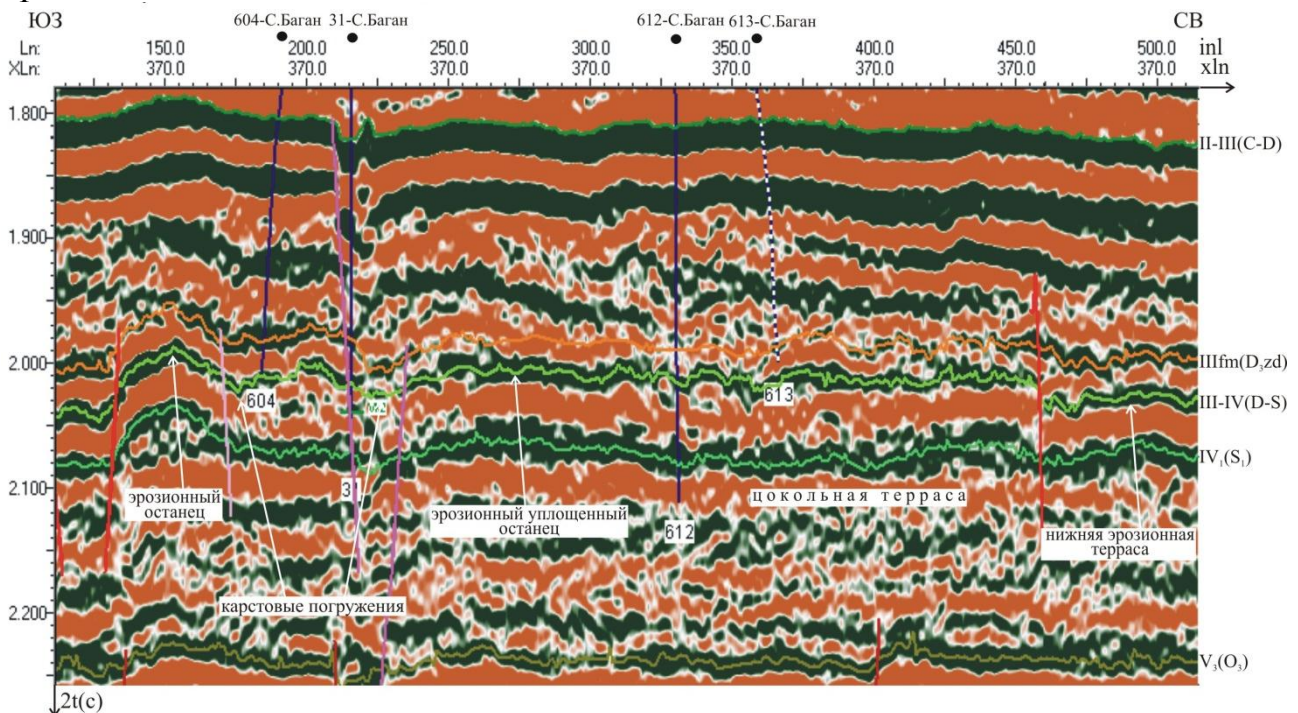


Рис. 1 - Пример взаимного положения в волновом поле ОГ II-III(C-D), III-IV(D-S) и V₃(O₃) в области карстовых воронок (Сандивейское поднятие),

Воробьева Л. Ф., Мартынов А. В.

Р.Д. Луксом (2007) было уделено особое внимание вопросам происхождения, классификации, фациальным зональностям, механической природе обрушения полостей в ходе естественного погружения. В своих исследованиях автор предлагает классификацию продуктов карстования и карстовых фаций, показанную на рисунке 2.

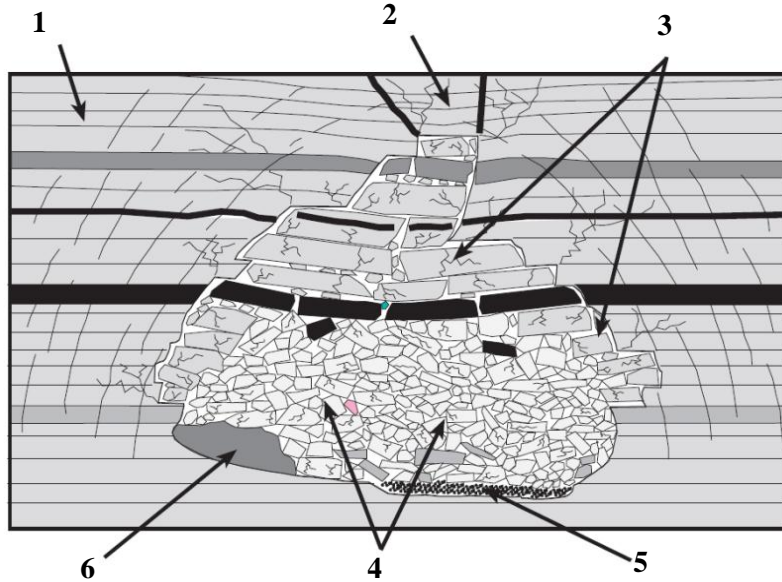


Рис.2 – Классификация продуктов карстования, Robert G. Loucks. 1 - недеформированный, 2 - слабодеформированный и 3 - сильнодеформированный слои, 4 - крупнообломочная и 5 - мелкообломочные брекчии, 6 - отложения, заполняющие пустотное пространство.

Согласно его исследованиям, палеокарстовая структура – это продукт приповерхностных карстовых процессов, которые включают в себя эрозию и вымывание полости за счёт растворения породы, частичное или полное разрушение стенок вокруг полости и последующего её заполнения обломками и отложениями. Современные аналоги палеокарстовых структур, карстовые полости формируются во фреатических и/или вадозных зонах. В большинстве случаев, полости вымываются в тех зонах, в которых наиболее сконцентрированы источники выхода грунтовых вод на поверхность, за счёт существующей внутри породы системы трещин, формирующих протянутую связь между источником (карстовые воронки) и выходом подземных вод (родники).

Методика интерпретации аномалий волнового поля, связанных с палеокарстом, была разработана Н. С. Борисовым, Л. Ф. Воробьевой, А. В. Мартыновым и др. на примере Баганского и Сандивейского поднятий. Согласно классификации данных авторов, основным объектом интерпретации является эрозионный уступ. По амплитуде и взаимному расположению уступов выделяются вторичные формы: цокольная терраса, эрозионная терраса, эрозионный останец, эрозионная долина и эрозионный канал (рис. 1). По результатам изучения промысловых данных был сделан вывод о том, что эрозионные останцы представляют наибольший интерес с точки зрения нефтеносности.

С точки зрения геомеханики, механизм разрушения палеокарстовых структур был описан в горной литературе (Kratzsch, 1983). Согласно проведённым исследованиям, каверновые полости находятся под постоянным геостатическим напряжением, весом столба вышележащих слоёв горных пород. Зона максимального напряжения вызвана наличием пустой карстовой полости во вмещающей породе. Анализ напряжённого состояния материала около вершины полости показывает, что величины напряжения зависят от геометрии и её размеров, длины полости, схемы приложения и величины внешних нагрузок. Эти факторы в совокупности могут быть учтены коэффициентом интенсивности напряжений K , для которого существует критическое значение K_c . При достижении критического значения ($K=K_c$), начинается обрушение полости, которое производит хаотичные брекчии разрушения внутри каверновой полости. Кроме этого, за счёт освобождения напряжения во вмещающей породе вокруг полости формируются дополнительные литогенетические трещины. При погружении разрушенной карстовой полости, происходит механическое уплотнение пород внутри неё, также возможно заполнение трещин эпигенетическими минералами.

Аспекты, изложенные выше, являются основными выдержками из созданной автором диссертации теоретической базы о природе формирования и строения палеокарстовых структур, а также об основных процессах, происходящих с ними на всех этапах геологической истории. Широкая редакция данного материала размещена в тексте диссертации.

Основными методами, включёнными в предлагаемую комплексную методику выделения и анализа палеокарстовых структур, является широко известное преобразование сейсмических волновых полей в разрезы и кубы импедансов путём сейсмической инверсии, а так же впервые использованная для участков Тимано-Печорской провинции, технология ортогональной декомпозиции сейсмических данных после суммирования.

Наиболее выдающиеся результаты использования сейсмической инверсии подробно описаны такими исследователями как М. А. Лаврентьев, С. П. Шишатский, С. А. Нахамкин, Ю. В. Ризниченко, Г. И. Петрашень, С. В. Гольдин, позже исследованиями в данной области успешно занимались А. И. Кобрунов, Ю. П. Ампилов, В. А. Дядюра, Г. Н. Гогоненков, М. Б. Рапопорт и другие.

Задачу инверсии сейсмических данных можно рассматривать как детерминистическую или стохастическую. Результатом любой детерминистической инверсии является единственная модель упругих свойств, которая удовлетворяет сейсмическим данным и априорным ограничениям.

Разработкой метода ортогональной декомпозиции (мультиатрибутного анализа сейсмических данных) занимались И. И. Приезжев и А. Сколлард. Предложенный метод основан на анализе главных компонент, для выполнения которого производится расчёт множества собственных значений и собственных векторов 3D функции автокорреляции исходного объёма сейсмических данных. Оба метода детально представлены в главах 2 и 3 диссертационной работы.

Вторая глава

В главе приводится описание исходных данных, выбор и комплексирование методов выделения зон развития палеокарстовых структур и оценки их влияния на расчленённость карбонатного коллектора по данным интерпретации кернового материала, ГИС и сейсмических параметров.

Объектом исследований является площадь в пределах Ижма-Печорской впадины, через территорию которой простирается полоса доманиковых рифовых построек. В непосредственной близости к исследуемому району расположены десятки площадей, на которых активно ведутся геологоразведочные работы, и для которых предлагаемая методика также будет актуальна. В качестве исходных данных были использованы данные сейсмических исследований 3D методом ОГТ, данные ГИС, описание керна и промысловые данные. Сейсморазведочные исследования МОГТ-3D на изучаемой площади были выполнены в сезоне 2002-2003 сейсмопартией 12-02 (Карпюк, 2003г., ОАО «Севергеофизика», г. Ухта). Полная кратность съёмки составила 24, источник возбуждения колебаний – взрывной. Цифровая обработка сейсмических данных выполнялась в партии цифровой обработки ОАО «Севергеофизика» в 2002-2003 годах (г. Ухта).

В рамках диссертационной работы дополнительная интерпретация данных выполнена автором диссертации в программном комплексе Petrel 2008.1 в 2013 году. Для работы с данными ГИС использовалась система «Прайм». Промысловые данные анализировались с помощью системы «Map manager». Были построены структурные карты по кровлям выделенных в скважинах стратиграфических интервалов, на которых отмечены особенности геологического строения территории, такие как, доманиковые рифовые постройки, палеокарстовые структуры в доманиково-сирачойском интервале (рис. 3,4), блоковое строение фундамента, локальные малоамплитудные тектонические нарушения в пермских отложениях (рис. 10) и т. д.

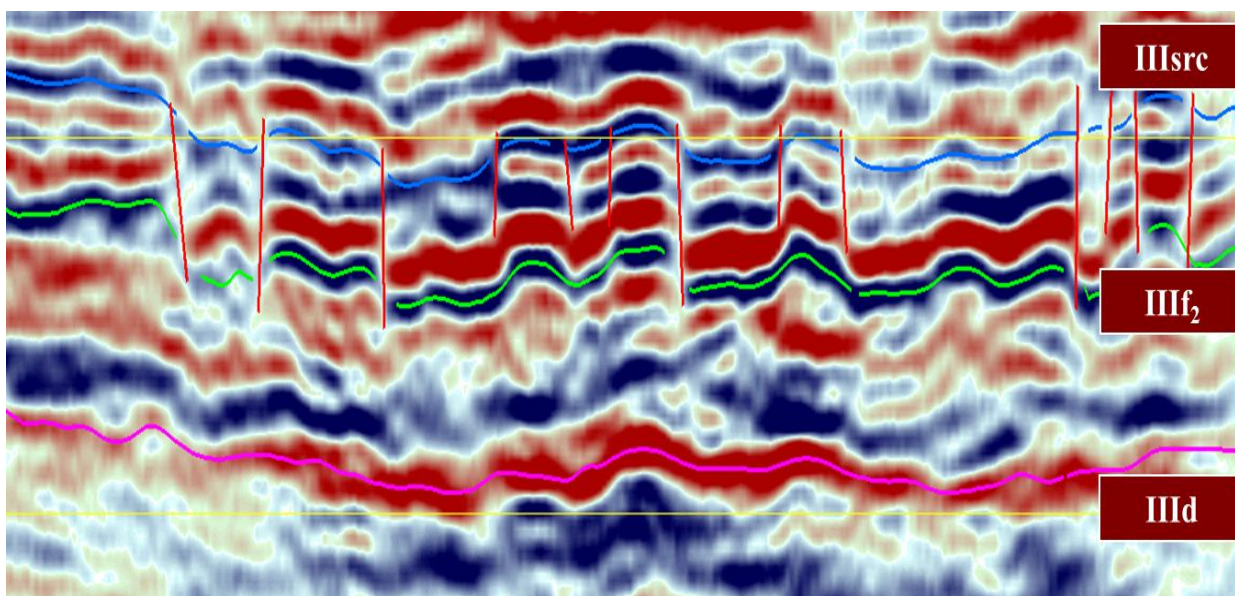


Рис. 3 – Фрагмент временного разреза, показывающий нарушение когерентности отражающего горизонта (вызванный наличием карстовых воронок)

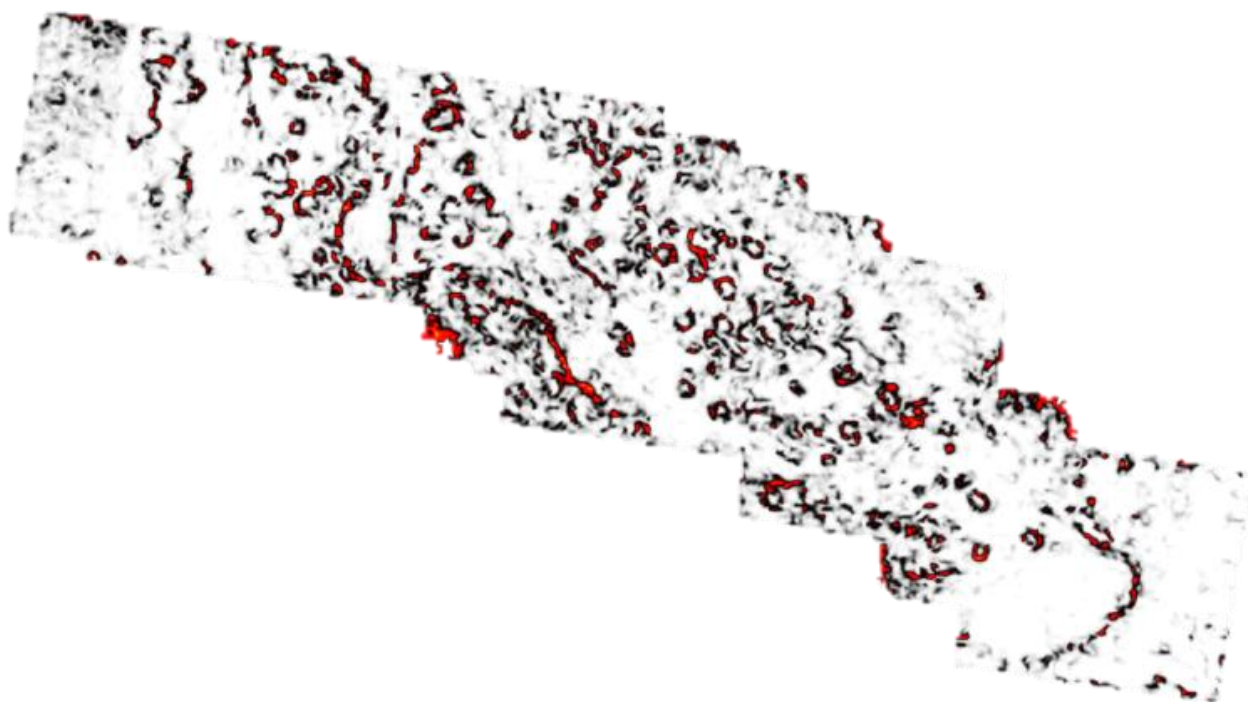


Рис. 4 - Поверхность параметра вариативности, показывающая аномалии кольцевой формы, характерные для палекарстовых структур.

Учитывая отсутствие или неоднозначность интерпретации палеокарстовых структур в исследованиях прошлых лет (классифицировались как малоамплитудные нарушения, особенности рельефа и т. п.) и их важность для определения строения залежей УВ, принято решение рассматривать доманиковский интервал как основной объект исследований. В дополнение к этому рассматриваемая система структур заслуживала внимания с точки зрения выявления органических построек, получения информации о процессах, происходивших на исследуемой территории, вызвавших появление карстовых полостей.



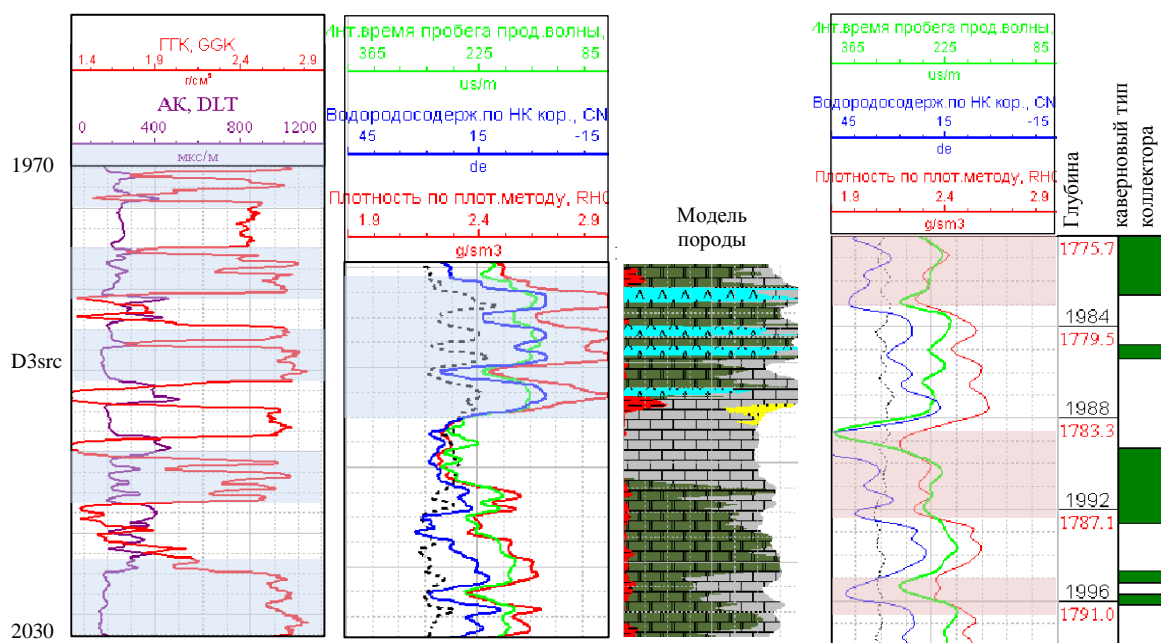
Рис. 5 – Палеорельеф изучаемого участка в доманиковское время (выполнен по результатам интерпретации сейсмических данных по ОГ Шf₂)

Как отмечено выше, промышленная нефтегазоносность рассматриваемой части Ижма-Печорской впадины связана, главным образом, с доманиковыми

рифогенными отложениями (Рис.5). В результате ранее выполненных сейсмических, литологических и геохимических исследований была разработана принципиальная модель формирования доманиково-сирачойского комплекса. Согласно этой модели, доманиковые отложения представлены рифогенным, депрессионным и зарифовым типами разрезов. Продуктивными и наиболее пористыми, как правило, являются верхние части рифовых массивов. Для отложений глубоководной впадины с некомпенсированным осадконакоплением характерен преобладающий карбонатный состав и присутствие силицитов, горючих сланцев и прослоев глин. Отложения зарифового мелководного шельфа доманикового горизонта занимают большую часть Ижма-Печорской впадины и представлены двумя типами разреза: с преобладанием терригенной или карбонатной составляющей. Частые эвстатические флуктуации уровня моря в позднедевонскую эпоху, когда мелководная морская обстановка в процессе регрессии сменялась на субаэральные гумидные условия, предопределили возможность протекания процессов карстования на исследуемой территории (S. J. Hallam, 1983). По результатам анализа карт параметра вариативности сделан вывод о том, что область зарифового мелководного шельфа доманикового времени являлась наиболее благоприятной для процессов карстования. Продолжительность доманикового времени составляет около 490-530 тыс. лет, за этот период могли быть сформированы карстовые полости, которые впоследствии были преобразованы постседиментационными процессами в различные формы палеокарстовых структур.

Для решения задачи выделения и характеристики палеокарстовых зон, была разработана комплексная методика, включающая в себя использование результатов анализа керна и геофизических исследований скважин, сейсмической инверсии и параметризации сейсмических данных после суммирования. Заданный алгоритм исследований (в рамках методики) позволит выделять палеокарстовые системы, оценивать их влияние на фильтрационно-ёмкостные свойства и оконтуривать участки с благоприятными коллекторскими зонами.

Первый этап методики – определение петрофизических зависимостей, характерных для палеокарстовых интервалов в разрезе скважин. Реализация этого этапа основывается на сопоставлении результатов анализа кернового материала, данных ГИС и промысловых данных с картой параметра вариативности (на которой оконтурены аномалии кольцевой формы, связанные с наличием палеокарстовых структур). По результатам определения текстуры породы и петрофизических особенностей палеокарстовых зон, используя данные исследований аналогичных структур и доступный керновый материал, были выявлены типовые параметры различных методов ГИС для палеокарстовых интервалов в пределах изучаемого участка, в которых пустотное пространство заполнено эпигенетическими минералами.



1) – в скважинах №1, №2 – отмечено наличие плотных пропластков и включений эпигенетических минералов в продуктивном интервале. Точки входа ствола скважин в доманиково-сирачойский интервал совпадают с аномалиями на карте вариативности и зонами распространения плотных пород по данным карты акустического импеданса.

2) В скважине №3 продуктивный интервал представлен известняками микрогустково-комковатыми водорослевыми, нефтенасыщенным, с крайне неравномерной пористостью и кавернозностью.

Рис. 6 – Фрагменты данных ГИС скважин, пробуренных в пределах исследуемой площади

Палеокарстовые зоны с включениями эпигенетических минералов в пределах изучаемого участка имеют аномально высокие скорости пробега звуковой волны, значения ГГКп и сопротивления, а также низкую нейтронную пористость в сравнении с проницаемыми зонами. Средняя нейтронная пористость в палеокарстовых зонах меньше чем 2%, в то время как в рифовых интервалах (также в продуктивных интервалах структур облекания) она варьирует в пределах от 4 до 25%. Средняя скорость пробега волны и значение ГГКп выше, чем 6,1 км/сек и 2,59 г/см³ (вплоть до 2,9 г/см³) соответственно (рис. 6). Значения ГГКп для «чистых» интервалов (без включений эпигенетических минералов) меньше чем 2,59 г/см³. График зависимости значений ГГКп и акустического каротажа для палеокарстовых интервалов, освещённых кернавым материалом, представлен на рисунке 7.

С использованием кривых акустического и гамма-плотностного каротажей, были рассчитаны значения акустического импеданса для палеокарстовых и чистых интервалов в скважинах. В палеокарстовом интервале акустическая жесткость, основываясь на характере заполнения пустотного пространства и исходя из выполненных расчётов, должна превышать значение – 15 255 ед.

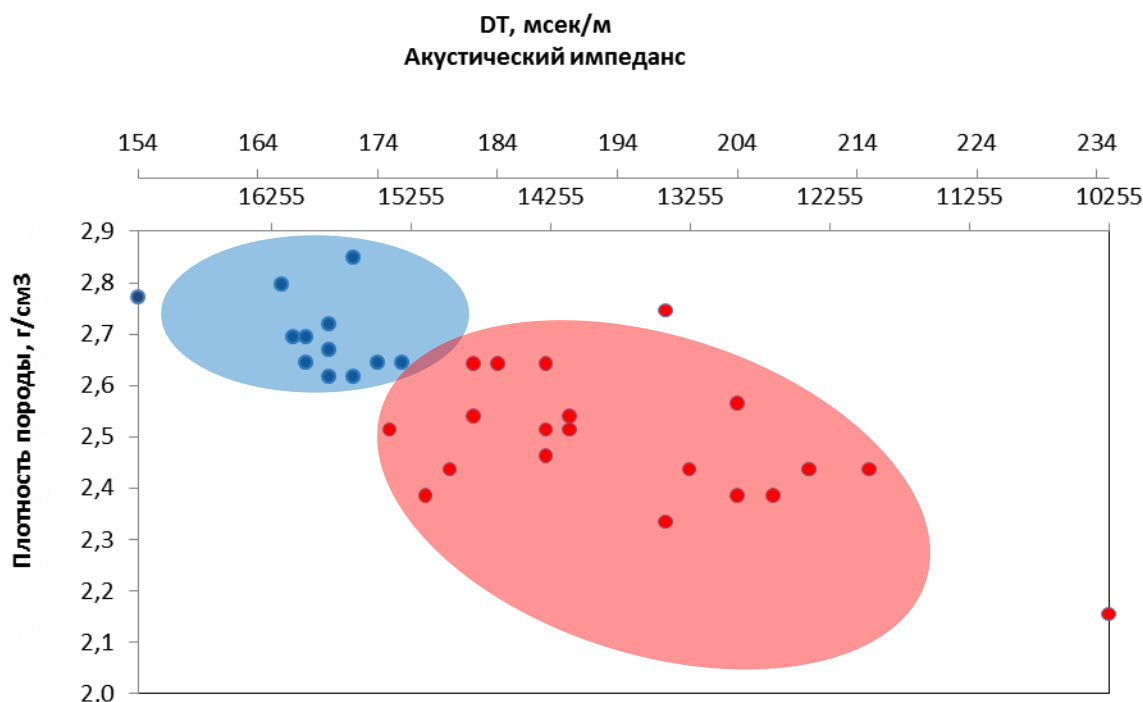


Рис. 7 – График зависимости значений ГГКп и акустического каротажа

При сопоставлении результатов анализа данных (латеральное распространение палеокарстовых структур, заниженные значения пористости и плотности в скважинах и их крайне различные дебиты), первый этап методики позволил сделать предположение, что участки скопления палеокарстовых структур в исследуемом районе являются зонами с пониженными фильтрационно-ёмкостными свойствами. Соответственно, для успешности последующего бурения, разработки залежей УВ такие зоны должны быть выявлены не только в пределах пробуренных скважин, но и по всему участку в целом. Для выполнения задачи определения геолого-геофизических параметров, контролирующей зональность доманиково-сирачойских отложений в пределах залежей нефти, в методику включен второй этап исследований – преобразование сейсмического волнового поля в куб импеданса путём сейсмической инверсии.

Инверсия в рассматриваемой области исследования – это преобразование геофизических параметров в физические свойства Земли (акустические, электрические и др.). Основная цель инверсии сейсмических данных – восстановление упругих свойств горных пород (в данном случае литология и плотность) или установление их связи с физическими условиями (давление, температура), при которых они находятся.

Инверсия может рассматриваться как детерминистическая или стохастическая задача, и может выполняться по сейсмическим данным до или после суммирования.

Проблема сейсмической инверсии состоит в неоднозначности её результатов. Под неоднозначностью подразумевается, что различные геологические условия могут вызывать одинаковые сейсмические отклики. Детерминистические методы не позволяют вероятностно оценить величину неоднозначности. В дальнейшем неоднозначность восстановления акустических и упругих пара-

метров может отразиться на результатах интерпретации и привести к неправильным геологическим выводам. С этой точки зрения важным является применение методики комплексирования качественной (анализ сейсмических параметров) и количественной (сейсмическая инверсия) интерпретации сейсмических данных (Шубин А.В, 2014).

В диссертационной работе Шубина А.В. предложена следующая классификация способов сейсмической инверсии:

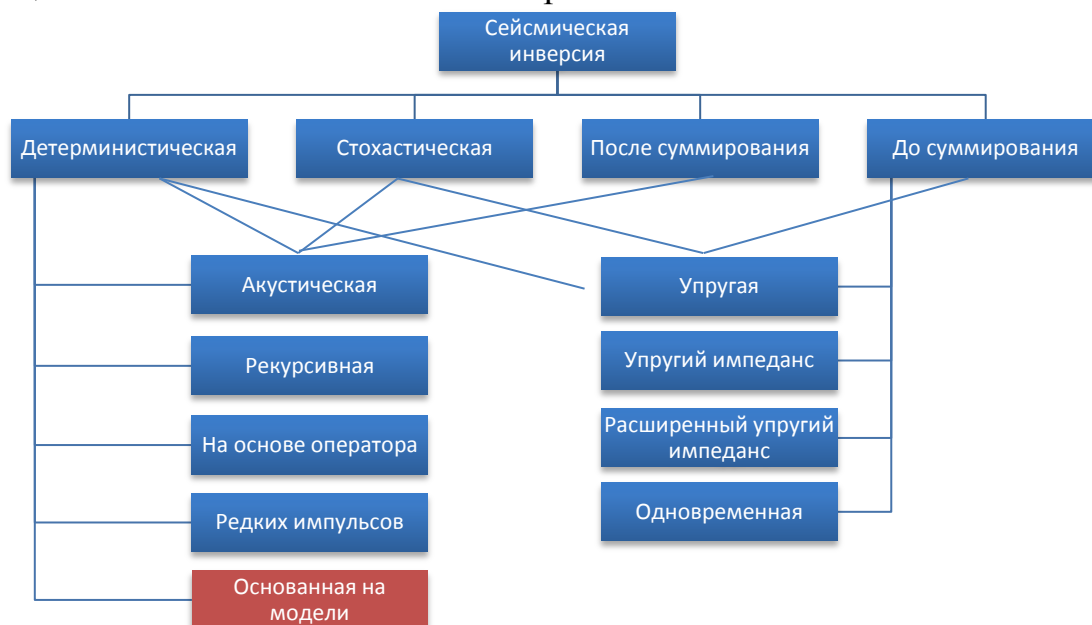


Рис. 8 – Способы сейсмической инверсии (по А.В.Шубину).

Термином акустическая инверсия обозначается процедура определения важнейшей характеристики модели среды – зависимости акустического импеданса ($I_p = V_p \times \rho$) от времени по записи отражённых волн при нормальном падении.

Распространение волн в упругой среде описывается волновым уравнением. На практике многие алгоритмы цифровой обработки и инверсии сейсмических данных основаны на свёрточной модели, которая может быть получена из акустической аппроксимации волнового уравнения. Сейсмическая трасса $s(t)$ является результатом свёртки сейсмического импульса $w(t)$ с временной последовательностью коэффициентов отражения $r(t)$ и добавлением шума $n(t)$:

$$s(t) = w(t) \cdot r(t) + n(t). \quad (1)$$

По мере прохождения импульса $w(t)$ в земле происходят две вещи: затухание амплитуд, вследствие расхождения фронта волны и процессов отражения, преломления на границах, и затухание частот вследствие эффекта поглощения и рассеивания, поэтому в любой момент времени импульс не будет таким же, как в момент срабатывания источника. В задаче инверсии сейсмических данных импульс, как правило, не известен и требует определения. Существуют различные методы оценки формы импульса, как с использованием данных ГИС (АК, ГТКп), так и без них.

Последовательность коэффициентов отражения r представляет отражательную способность ряда геологических слоёв, которые разделены временными интервалами, и является функцией акустического импеданса:

$$r_i = \frac{I_{i+1} - I_i}{I_{i+1} + I_i}, \quad (2)$$

где i – индекс слоя.

Одним из наиболее популярных и коммерчески успешных методов акустической инверсии является метод инверсии, основанный на модели (Model-based), который был также применён и для данных исследований. Существует два подхода к выполнению инверсии, основанной на модели: обобщенная линейная инверсия и инверсия, основанная на модели.

Процесс инверсии называется обобщённой линейной инверсией, потому что начинается с некоторого первичного приближения решения, за которым следует последовательное уточнение решения посредством ряда дополнительных шагов. Каждый шаг улучшает соответствие между синтетическими и реальными данными.

Метод обобщённой линейной инверсии основан на разложении функции в ряд Тейлора:

$$F(I) = F(IG) + \frac{\partial F(IG)}{\partial IG} \cdot (I - IG) + \frac{\partial^2 F(IG)}{\partial IG^2 2!} \cdot (I - IG)^2 + \dots, \quad (3)$$

где I – искомая модель импедансов, IG – начальная модель импедансов, $F(I)$ – наблюдаемая сейсмическая трасса, $F(IG)$ – синтетическая трасса, рассчитанная из уравнения IG , $\frac{\partial F(IG)}{\partial IG}$ – матрица частных производных.

Сократив ряд Тейлора, линеаризуем функцию:

$$F(I) - F(IG) \approx \frac{\partial F(IG)}{\partial IG} \cdot (I - IG). \quad (4)$$

Такое уравнение решается относительно коррекционного вектора $(I - IG)$ итерационно методом наименьших квадратов. Ошибка вычисляется на каждой итерации в виде $\sum [F(IG) - F(I)]^2$. Итерации продолжаются до тех пор, пока ошибка не опустится ниже установленного уровня. Окончательное решение получается из уравнения:

$$I \approx IG + (I - IG). \quad (5)$$

Проблема неоднозначности для данного алгоритма разрешается следующим образом:

Во-первых, учитывается первичное предположение, поскольку решения, получаемые в ходе обобщённой линейной инверсии, обычно близки к первичному предположению. Учёт априорной информации осуществляется жёсткой фиксацией акустических импедансов реперных пластов.

Во-вторых, целевая функция на каждом шаге уравнивается функцией штрафа, которая определяет, насколько далека модель от первичного предположения.

На результат обобщённой линейной инверсии влияет как первичное предположение, которое было избрано, так и баланс между соответствием реальным данным и ограничениями, налагаемыми первичным предположением.

И. К. Кондратьев и Ю. А. Киселев модифицировали алгоритм обобщенной линейной инверсии. Основным достоинством модифицированного алгоритма является возможность гибкого задания априорной информации с сохранением линейности процедур.

Коэффициенты отражения при нормальном падении определяются контрастами акустических импедансов (I) и могут быть записаны:

$$R_i \approx \frac{1}{2} \Delta \ln(I_i) = \frac{1}{2} [\ln I_{i+1} - \ln I_i]. \quad (6)$$

Для N коэффициентов отражения уравнение может быть записано в матричном виде:

$$\begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_N \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & \dots \\ 0 & -1 & 1 & \dots \\ 0 & 0 & -1 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_1 \\ L_1 \\ \vdots \\ L_N \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где $L_i = \ln(I_i)$.

Далее запишем свёрточную модель сейсмической трассы в матричном виде:

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_N \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \omega_1 & 0 & 0 & \dots \\ \omega_2 \omega_1 & 0 & \dots & \dots \\ \omega_3 \omega_2 \omega_1 & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 \\ R_1 \\ \vdots \\ R_N \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где $T_i - i$ отсчёт сейсмической трассы, $\omega_j - j$ член извлечённого сейсмического импульса.

Подставляя матрицу (7) в (8), получим окончательное выражение:

$$T = \frac{1}{2} WDL, \quad (9)$$

где W – матрица, определяющая импульс, D – матрица определитель из (7). На практике такое уравнение решается итерационно методом сопряжённых градиентов. Начальным приближением является низкочастотная фоновая модель.

По изложенному выше алгоритму была рассчитана карта акустического импеданса для ОГ Шф₂ (кровля доманикового горизонта).

В палеокарстовых интервалах пустотное пространство включает в себя каверновые и межзернистые поры, также трещины и брекчии. В изученных образцах керна из палеокарстовых интервалов, за исключением нескольких открытых трещин со следами нефти, большая часть порового пространства заполнена эпигенетическими минералами, либо плотными породами. Чёткая петрофизическая разница между палеокарстовыми интервалами и «чистыми» зонами, выявленная с помощью ГИС, позволяет использовать сейсмическую инверсию для того, чтобы оконтуривать латеральное и вертикальное распространение палеокарстовых зон в пределах изучаемой площади.

сква. 24г, №7 и №3 – отмечены включения ангидрита в продуктивных интервалах

сква. № 7 и № 9 с меньшими дебитами

сква. №11 и №12 – Низкий Кпр

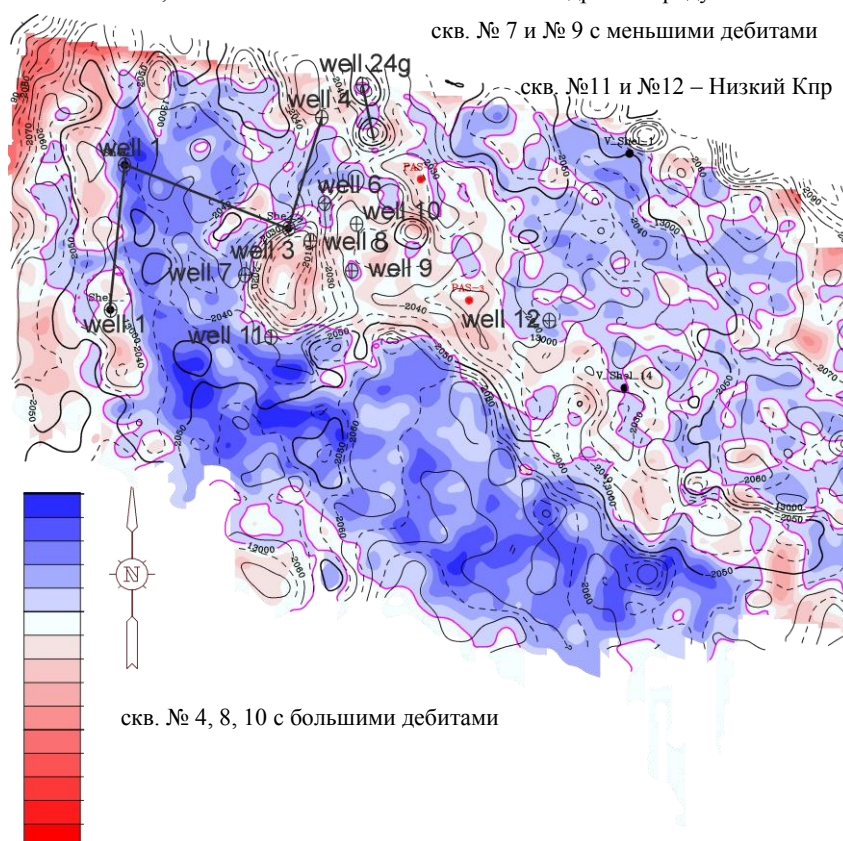


Рис. 9 – Карта средних значений акустического импеданса в верхнедоманиковых отложениях.

Интенсивное послекарстовое заполнение эпигенетическими минералами значительно сокращает первичную и вторичную, связанную с карстованием, пористость, а также нарушает гидродинамическую связь внутри коллектора. Анализ керн показывает среднюю пористость и проницаемость в палеокарстовых зонах меньше чем 2% и 1 мД соответственно. Эти условия отвечают карстовым зонам с пониженными фильтрационно-ёмкостными свойствами. Для потенциального коллектора, пористость и проницаемость должны быть выше, чем 5-7% и 30 мД соответственно.

Из рисунка 9 видно, что наименьшие значения импеданса соответствуют самым верхним частям доманикового разреза. Пласты-коллекторы в этих скважинах нефтенасыщены. В тех интервалах разреза, где коллекторы отсутствуют, значения импеданса составляют 15000-17000 ед. для карбонатного разреза. Результаты исследований, изложенные в главе 2, показывают, что в палеокарстовом интервале акустическая жёсткость, превышает значение – 15 255 ед. Данные значения на карте акустического импеданса ОГ Шф₂ имеют устойчивую корреляцию с промысловыми данными (рис. 9), а также с картами параметра вариативности для того же отражающего горизонта.

Третья глава

Глава посвящена решению задачи выявления зон с благоприятными коллекторскими свойствами в пределах карбонатного коллектора, учитывая информацию, полученную при выполнении первых двух этапов предлагаемой ме-

тодики, с помощью включения третьего этапа – ортогональной декомпозиции сейсмических данных.

В настоящее время уже не вызывает дискуссий вопрос о ведущих ролях трещиноватости в фильтрационных свойствах плотных пород-коллекторов и межзерновой пористости и кавернозности в аккумуляции в них нефти и газа (Смехов Е. М). Естественно, поскольку трещиноватость горных пород резко повышает их проницаемость, для выявления таких коллекторов как по площадям, так и по разрезу трещиноватость является основным параметром. Соответственно, в мировой практике всё большее внимание уделяется коллекторам, поровое пространство которых представлено системами естественной трещиноватости. Малоамплитудные разломы и зоны природной трещиноватости имеют определённые характеристики в пространственном сейсмическом поле. Для того чтобы извлечь пользу геометрических свойств таких структур, на временном сейсмическом срезе или временном профиле, в данных исследованиях применён метод ортогональной декомпозиции сейсмических данных, разработанный И. И. Приезжевым и А. Сколлардом.

Основная цель метода ортогональной декомпозиции – выделение зон природной трещиноватости. Такие зоны или мелкие нарушения, обычно распознаваемы на сейсмических данных, как малоамплитудные полукогерентные аномалии на временных разрезах, либо как линеаменты на временных сейсмических срезах. При наличии мелких разломов и зон трещиноватости, образованных геомеханическими процессами обрушения карстовых полостей, в сейсмическом поле существует вариация скоростей в пространственных направлениях, как результат, амплитуда сейсмического куба варьирует вдоль разных направлений, что позволяет распознавать трещины или мелкие разломы на сейсмике в виде линеаментов на временном сейсмическом срезе или профиле. На рисунке 10 показаны линеаменты на временном срезе параметра вариативности в пермском интервале, которые обусловлены наличием малоамплитудных нарушений типа «сброс».

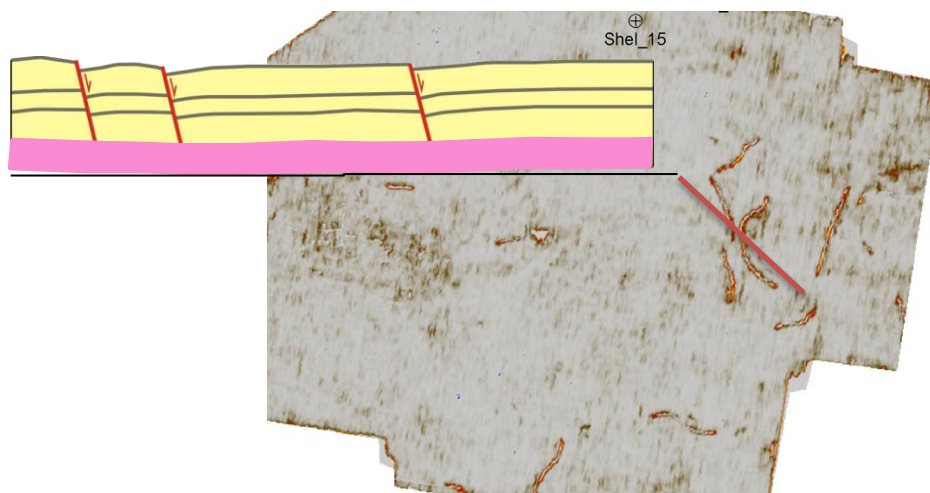


Рис. 10 – Линеаменты, отображающие малоамплитудные тектонические нарушения в пермском интервале изучаемой площади

Технология ортогональной декомпозиции основана на анализе главных компонент. Для её выполнения производится расчет множества собственных значений и собственных векторов 3D-функции автокорреляции исходного объёма сейсмических данных. Каждая ортогональная компонента является отдельным сейсмическим кубом. Сумма всех рассчитанных компонент близка к исходному кубу. Таким образом, термин ортогональность означает, что коэффициент корреляции между любыми двумя компонентами равен нулю.

Так как наличие сейсмического шума и эффект следов расстановки приборов не имеют корреляции с важными сведениями о строении пласта, такими как трещины, мелкие разломы, расположение отражающих горизонтов или других скрытых структур, они выведены в отдельные ортогональные компоненты.

Теоретическая основа использованного метода изучения трещиноватости путём анализа скрытых структур в сейсмических данных через применение процесса ортогональной декомпозиции заключается собственно в самой ортогональной декомпозиции, известной так же, как декомпозиция Карунена-Лоэва, а также в анализе главных компонент.

Теорема Карунена-Лоэва – это представление случайного процесса в виде бесконечной линейной комбинации ортогональных функций, аналогичное представлению рядов Фурье – последовательному представлению функций на ограниченном интервале. В отличие от рядов Фурье, где коэффициенты являются действительными числами, и базис представления состоит из синусоидальных функций (то есть, из функций синус и косинус с разными частотами), коэффициенты в теореме Карунена-Лоэва – случайные переменные, и базис представления зависит от процесса.

Метод анализа главных компонент был разработан в 1933 году Хотеллингом. В общих чертах данная теория была изложена Миллиганом в 1978 году, и заключается в том, что набор сейсмических трасс преобразовывался в векторный вид (x_{ik}) , где $k = 1, \dots, N$ – это индекс каждой трассы и $i = 1, \dots, M$ – это индекс каждого элемента. Средний индекс трасс и ковариационная матрица рассчитывается по формуле:

$$x_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_{ik}, \quad (10)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (x_{ik} - x_i)(x_{jk} - x_j). \quad (11)$$

Автором теории было сделано предположение о том, что средний индекс и ковариационная матрица содержат в себе всю статистическую информацию о данных. Ковариационная матрица инвертировалась для того, чтобы создавать набор собственных векторов и собственных значений. Процесс инверсии создаёт M -собственные вектора, которые как набор векторов имеют свойство быть ортогональными. Вклад каждого вектора в общую вариативность данных пропорционален соответствующему собственному значению. Процесс инверсии создаёт собственные векторы в направлении уменьшающихся собственных значений. M -собственные вектора, которые содержат N -элементы, могут быть коррелированы с каждой трассой для того, чтобы получить коэффициент, выражающий вклад собственного вектора в трассу. Каждая трасса, таким образом,

может быть посчитана как линейная комбинация M -собственных векторов, или главных компонент по формуле:

$$x_{ij} \approx x_{f_{ij}} = \sum_{m=1}^{Mf} \alpha_{mk} Z_{mi}, \quad (12)$$

где $x_{ij} \approx x_{f_{ij}}$ – это актуальный расчёт m - ого образца k - ой трассы, Z_{mi} – это i - ый образец m - ого собственного вектора, α_{mk} – коэффициент корреляции собственного вектора Z_{mi} и трассы x_k .

Процент общей вариативности данных, которые рассчитаны для первой Mf - главной компоненты, считается по формуле:

$$\sigma(Mf) = \frac{\sum_{m=1}^{Mf} \lambda_m}{\sum_{m=1}^M S_{mm}}, \quad (13)$$

где λ_m = m - ое собственное значение, и S_{mm} это диагональная компонента ковариационной матрицы.

В данных исследования расчёт главных компонент свёлся к расчёту собственных векторов и собственных значений 3D – функции автокорреляции оригинального сейсмического куба после суммирования. В соответствии с приведённым выше алгоритмом, полученные ортогональные сейсмические кубы ранжированы по их вкладу в общую волновую сумму исходного куба. Другими словами, применен метод мультиатрибутного анализа данных после суммирования, но все атрибуты представляют тот же исходный куб, но с заданным заранее смещением. Для того чтобы получить эти атрибуты, все значения оригинального сейсмического куба считывались в скользящем 3D – окне. Максимальная задержка должна быть равна или больше, чем структуры, которые необходимо обнаружить. В основе анализа главных компонент лежит уравнение:

$$S_{mm} = \Phi^T S \Phi, \quad (14)$$

где S - это ковариационная матрица для многомерного вектора X . В нашем случае S - это 3D – функция автокорреляции куба согласно заранее определённой максимальной задержки. Φ - это матрица собственных векторов, которые ортогональны друг к другу, и S_{mm} - это диагональная матрица собственных значений.

Основное достоинство анализа главных компонент состоит в том, что собственные вектора, которые соответствуют главным компонентам, не коррелируемы, что и является прямым признаком их ортогональности.

Собственный вектор, соответствующий максимальному собственному значению ковариационной матрицы, определяет первую главную компоненту, которая рассматривается как фоновый фактор. Уравнение расчета представлено ниже:

$$O_{ijk}^r = \frac{\lambda^r (S_{max} - S_{min})}{NML\sqrt{\lambda^r}} \sum_{n=-N/2}^{N/2} \sum_{m=-M/2}^{M/2} \sum_{k=-L/2}^{L/2} \frac{(S_{i+n,j+m,k+l} - S_{avr})}{(S_{max} - S_{min})} \phi_{n,m,l}^r, \quad (15)$$

где O_{ijk}^r это - ортогональная компонента для i, j трасс и k образца куба, $S_{i+n,j+m,k+l}$ - это значения сейсмического образца для i, j трасс и k образца куба, где n, m, l задержки в i, j и k направлениях. N, M, L - это максимальные задержки, $S_{avr}, S_{max},$ и S_{min} это средние, максимальные и минимальные значения

амплитуды куба соответственно, λ^r и $\phi_{n,m,l}^r$ это - собственное значение и r - собственный вектор соответственно.

На рисунке 11 показана поверхность ОГ Шф₂ в пределах изучаемого участка. Разложение на главные компоненты исходного сейсмического объёма проводилось для данной поверхности окном 5 мс. Для поверхности третьей компоненты для более наглядного отображения наличия зон внутрислоистой напряженности была выполнена процедура ант-трекинга (Ant-tracking).

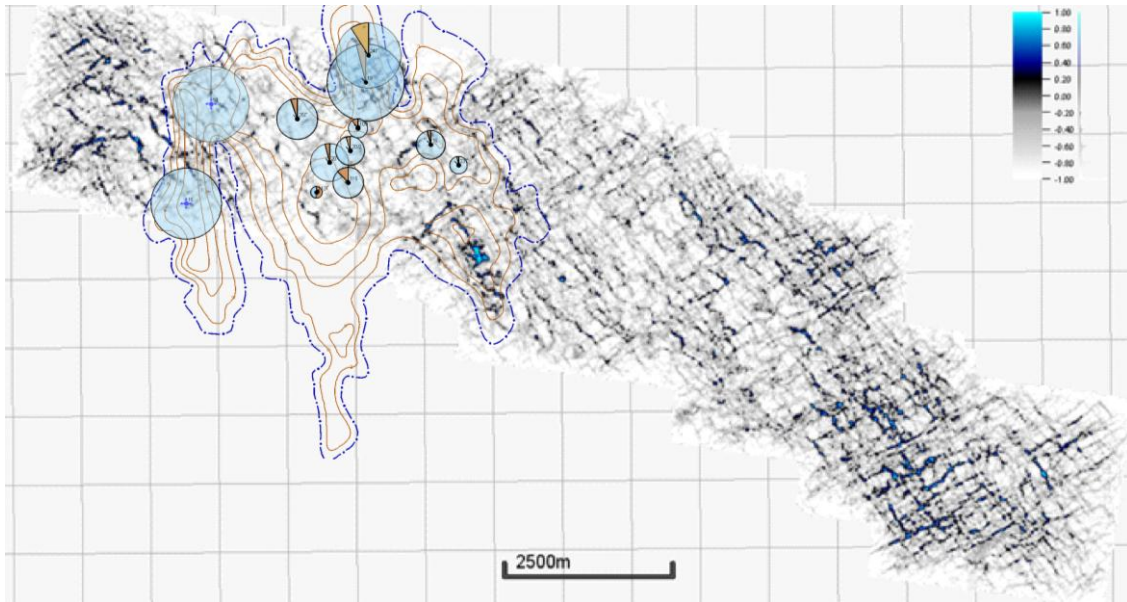


Рис. 11 – Зависимость начальных дебитов скважин от зон расположения аномалий на поверхности ОГ Шф₂ площади (после ортогональной декомпозиции и ант-трекинга)

В нашем случае процесс калибровки полученных результатов со скважинными данными был невозможен, так как регистрация имиджей микробоккового каротажа (FMI) в скважинах данной площади по ряду объективных причин не проводилась. Калибровка результатов выполнена путём сопоставления полученной поверхности с промысловыми данными (текущая и начальная карты разработки). Скважины с большими дебитами (приемистостью), что, в сложных карбонатных коллекторах, характерно для высоко проницаемых зон с развитой системой трещин, располагаются в зонах с повышенной концентрацией аномалий. Зоны с меньшей концентрацией аномалий могут быть охарактеризованы как низко проницаемые, что также может быть подтверждено дебитами скважин.

После выявления систем трещин и бурения скважин в пределах их развития немаловажным останется вопрос о возможности получения значительных объёмов нефти из таких зон, либо данные трещины окажутся залеченными эпигенетическими минералами. Исходя из этого, процесс прогнозирования наличия систем трещин необходимо комбинировать со знаниями о геологическом строении коллектора, полученными в ходе анализа гидродинамической связанности коллекторов в зонах развития палеокарстовых структур.

Четвёртая глава

В четвёртой главе приводится сопоставление полученных результатов применения комплексной методики путём совместного анализа структурных карт, карт параметра вариативности, акустического импеданса и ортогональной декомпозиции. Выделены две обособленные зоны, имеющие благоприятные для формирования скоплений углеводородов, гипсометрические отметки и значения акустического импеданса, а так же наличие аномалий на карте ортогональной декомпозиции, связанных с трещиноватостью, и отсутствие аномалий на карте вариативности, характерных для палеокарстовых структур. Наиболее полно результаты исследований калибруются между собой в зоне 1-S (Ариельская структура). Учитывая пониженные значения акустического импеданса, в этой зоне прогнозируется наличие коллекторов в доманиково-сирачойских отложениях с благоприятными фильтрационно-ёмкостными свойствами. Согласно расположению аномалий на карте ОГ Шf₂ ортогональной декомпозиции, в зоне 1-S прогнозируется наличие трещин северо-западного простирания. Отсутствие в зоне системы палеокарстовых структур, с выполненным твёрдыми минералами поровым пространством, подтверждается картой вариативности для ОГ Шf₂. Рекомендуется бурение в данной зоне поисковой скважины с отбором керна из доманиково-сирачойского интервала и выполнением исследований пластовым микроимджером для выявления трещинных интервалов и определения азимута их распространения.

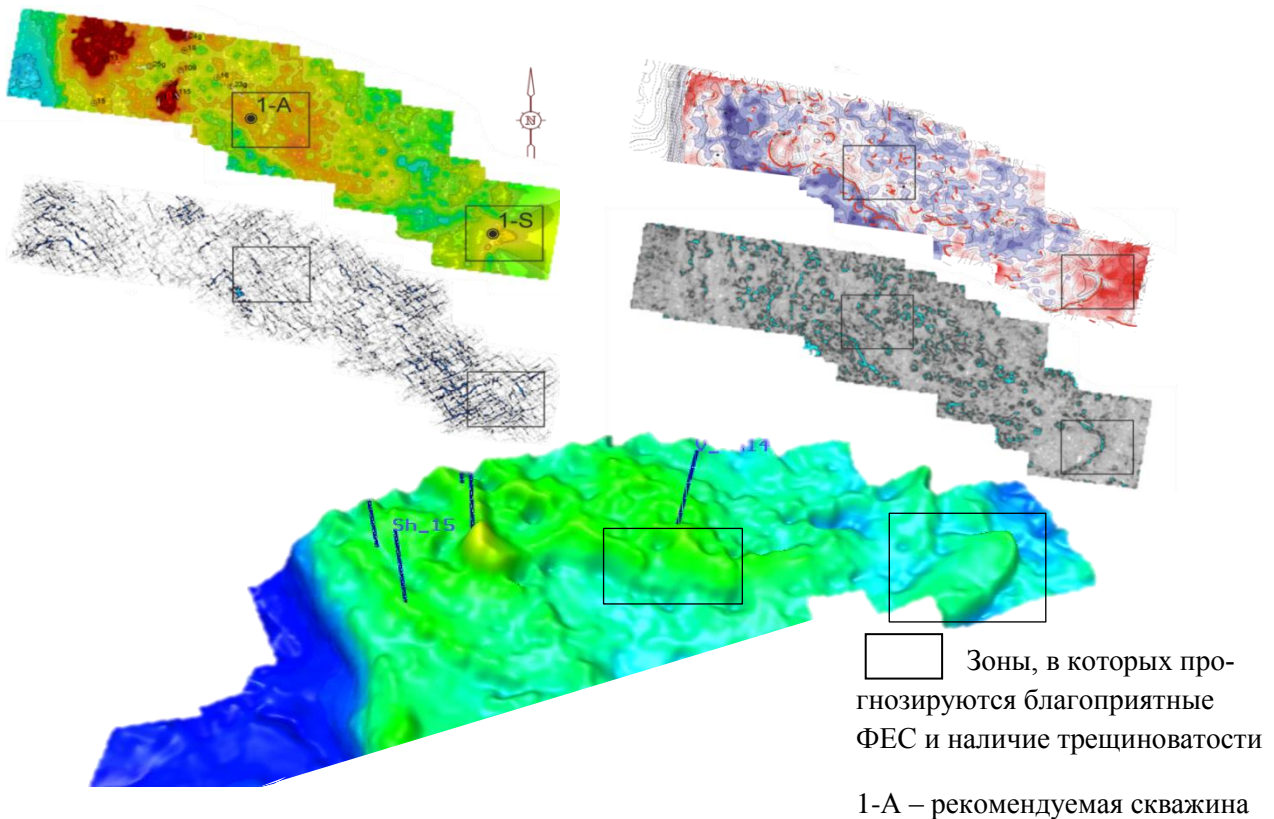


Рис. 12 – Выделение перспективных зон в пределах исследуемого района по результатам комплексных исследований

Основные результаты и выводы

1. На примере литофациальной модели доманиково-сирачойских отложений сформирован обширный объём теоретической информации о природе происхождения и особенностях строения палеокарстовых структур, выделенных в пределах Ижма-Печорской впадины, который явился основой для разработки и научного обоснования комплексной методики выделения таких структур.

2. Выполнена классификация геолого-геофизических параметров в разнофациальных доманиково-сирачойских отложениях, в том числе для палеокарстовых интервалов. Для них по данным ГИС в пределах исследуемого района характерны высокие значения скорости пробега волны (более 6 км/с) волны и плотности породы (2,7-2,9 г/см³), по данным сейсморазведки 3D характерны повышенные значения акустического импеданса (15 000-17 000 ед.) и значения параметра вариативности на краях структур (более 0,6 ед.).

3. Определены петрофизические характеристики палеокарстовых интервалов разрезов скважин исследуемой территории. В зонах развития палеокарстовых структур на исследуемой площади фильтрационно-ёмкостные свойства коллектора являются неблагоприятными для его промышленной разработки (пористость меньше 2%, проницаемость меньше 1 мД.)

4. С помощью комплексирования всей полученной информации автором разработана методика выявления зон с благоприятными коллекторскими свойствами в пределах карбонатного массива палеокарстового типа с использованием данных керна, ГИС, 3D сейсмической инверсии и ортогональной декомпозиции. Использование методики в пределах исследуемого района позволило оконтурить, перспективные для последующего бурения, зоны.

Список опубликованных работ по теме диссертации

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Скворцов А. А. Комплексный метод выделения палеокарстовых структур в доманиково-сирачойских карбонатных отложениях Щельяюрской площади, Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции / А. А. Скворцов, В. Е. Кулешов // электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2014. №6. С. 260-276. URL:http://ogbus.ru/issues/6_2014/ogbus_6_2014_p260-276_SkvortsovAA_ru.pdf

2. Скворцов А. А. Выделение систем естественной трещиноватости по данным 3D сейсмического моделирования карбонатного коллектора на примере Щельяюрского месторождения. А. А. Скворцов, В. Е. Кулешов // электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2014. №6. С. 242-259. URL:http://ogbus.ru/issues/6_2014/ogbus_6_2014_p242-259_SkvortsovAA_ru.pdf

Статьи в других изданиях:

3. Skvortsov A., Kuleshov V. Paleokarst development zones in the Upper Devonian Domanik Group, Timan-Pechora basin // Life Science Journal. 2014. №68. p. 512-513.

4. Скворцов А. А. Выделение палеокарстовых структур по результатам интерпретации 3D сейсмических исследований в пределах Ижма-Печорской впадины // Научно-техническая конференция преподавателей и сотрудников УГТУ: материалы научно-технической конференции (22-24 апреля 2014 года) / под ред. Н. Д. Цхадая. – Ухта : УГТУ, 2014, - с. 215-222.

5. Скворцов А. А. Геология и перспективы нефтегазоносности участка в пределах Ижма-Печорской впадины // Международный семинар «Рассохинские чтения»: материалы международного семинара (7-8 февраля 2014 года) / под ред. Н. Д. Цхадая. – Ухта : УГТУ, 2014, - С. 189-193.

6. Скворцов А. А. Характеристика палеокарстовых структур на основе комплексного использования 3D сейсмических исследований, анализа керна и скважинной геофизики // Международная молодежная научная конференция «Севергеозкотех-2014»: материалы международной конференции (26-28 марта 2014 года) / под ред. Н.Д. Цхадая. – Ухта : УГТУ, 2014, - с. 135-140.

7. Skvortsov A., Elders C., 2013 Geology and petroleum potential assessment of the S-area in Izhma-Pechora depression, Timan–Pechora Basin. 2013, Independent project report submitted for the Master of Science degree in RHUL Petroleum Geoscience department. London, Z18, p.92

8. Скворцов А. А., Применение технологии газодинамического разрыва пласта верхнедевонских терригенных отложений Усинского месторождения // Конференция молодых специалистов ООО «ЛУКОЙЛ-Коми»-2012»: материалы конференции (26-28 марта 2012 года) – Усинск, 2012, - с. 26-32.

Тезисы на международных конференциях:

9. Skvortsov, A., Kuleshov, V., Ajiboye, M., & Agafonova, O., 2014, An approach to tight paleokarst zones identification based on integrated use of 3D seismic surveys, core and well-log data and implication to reservoir quality. Extended abstract, 2014 SPE Annual Technical Conference & Exhibition, Moscow, 171210-RU, 8p.

10. Skvortsov A., Kazanenkova A., Istomina Y., Zunde D., Shakirova G. Hydrocarbon potential assessment of Cooper basin. Extended abstract, 2013 AAPG Imperial Barrel Awards, P684, p. 18