

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

*На правах рукописи*

**Ахиярова Елена Робертовна**

**Методика динамического анализа сейсмических  
данных для изучения строения доюрского комплекса  
Нюрольской структурно-фациальной зоны  
Западной Сибири**

1.6.9 – Геофизика (технические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**

**Диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Москва – 2023

Диссертация подготовлена на кафедре сейсмометрии и геоакустики геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

- Научный руководитель:** *Шалаева Наталия Владимировна, кандидат геолого-минералогических наук, доцент*
- Официальные оппоненты:** *Калмыков Георгий Александрович, доктор геолого-минералогических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, профессор*
- Тихоцкий Сергей Андреевич, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, ФГБУН Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, директор*
- Гриневский Антон Сергеевич, кандидат технических наук, ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг», отдел технологий сейсмических исследований, ведущий геофизик*

Защита диссертации состоится 30 мая 2023 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета МГУ.016.6 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, геологический факультет, ауд. 415.

E-mail: [dmsu0403@yandex.ru](mailto:dmsu0403@yandex.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/016.6/2487>

Автореферат разослан «\_\_» апреля 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук

К.М. Кузнецов

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность исследований и степень ее разработанности**

Истощение традиционных нефтегазоносных комплексов для территории Западной Сибири обуславливает огромный интерес к глубокозалегающим стратиграфическим горизонтам, относящимся к категории трудноизвлекаемых (Кузьменков, 2018). Открытие в последние годы значительных по запасам высокодебитных месторождений нефти и газа в породах фундамента вызывает серьезный интерес к этому объекту у геологов России и всего мира.

Одним из основных таких новых объектов, по мнению ряда исследователей (Алиевой и др., 1987; Гаврилова, 1988, 1998; Дмитриевского и др., 1990, 1992; Кабышева, 1991; Шустера, 1994, 1997; Арешева и др., 1997; Исаев, 2010; и других), являются породы фундамента, в данном случае – резервуары доюрского нефтегазоносного комплекса (Шустер, 2003).

Нефтегазоносность доюрских отложений в пределах Томской области была установлена еще в середине прошлого века бурением глубокой скважины на Колпашевской площади. На 2018г. в этом регионе на государственный баланс поставлено 25 месторождений с залежами, приуроченными как к промежуточному структурному этажу — к зоне коры выветривания, так и к коренным отложениям палеозоя, которые нередко гидродинамически объединяются в одну залежь.

Но при этом поиски залежей в доюрский комплекс (ДЮК) и открытия этих месторождений можно считать достаточно случайными – исследования проводились попутно с изучением вышележащих объектов, поэтому скважины закладываются исключительно исходя из положения ловушек в юрских и меловых отложениях в апикальной части поднятий, что часто ведет к отрицательным результатам для освоения доюрского комплекса.

В последнее время многие работы посвящены исследованию слабоизученного доюрского комплекса. Появляются исследования по проблемам выделения перспективных территорий для поисков скоплений нефти и газа в глубокозалегающих доюрских комплексах Западной Сибири (Лобова, 2018). Большая работа по изучению ядерного материала скважин, геологического строения и перспектив нефтегазоносности доюрских отложений исследуемого района выполнена В. С. Бочкаревым, Е. Г. Журавлевым, Т.А. Лапинской, В. С. Сурковым, П. Е. Сынгаевским и другими исследователями. Пока еще большая часть исследований строится на информации по данным скважин и региональных исследований, что имеет достаточно большую масштабность. В последние годы анализ доюрского

основания начинает больше базироваться на площадных геофизических методах – методах потенциальных полей и сейсморазведки.

Отдельные исследования посвящены не только строению и нефтегазоносности коренного палеозоя Западной Сибири (Конторович, 1975), но также и интервалу коры выветривания, который относят к породам фундамента и который является важным продуктивным интервалом (Журавлев, 1973; Конторович 1991, 2006, 2007, 2018; Елкин и др., 2001; Недоливко, Ежова, 2005; Мариненкова, 2005; Медведев, 2006; Лифанов, 2012; Koveshnikov et al., 2016, Лобова и др, 2019).

Помимо второстепенности исследований и открытий месторождений в ДЮК случайным образом, скудность исследований доюрского комплекса в том числе связана и с ограниченностью инструментальной сейсморазведки. Уровень обработки и полевых работ предыдущих лет не позволял как следует изучать разрезы доюрского комплекса, тем более исследовать динамические характеристики волнового поля.

Сейчас мы пришли к тому, что, с одной стороны, у нас появился инструментарий необходимого уровня, хорошо зарекомендовавший себя при изучении других типов разреза, в том числе и вышележащих отложений Западной Сибири, с другой стороны, появились и сейсмические данные высокого качества, позволяющие получать качественные изображения сейсмического разреза ДЮК и даже исследовать в нем динамические параметры записи в контексте прогноза его свойств.

Помимо уже ставших классическими для исследований осадочного чехла методик анализа сейсмических атрибутов (Rutherford, 1989; Castagna, 1993, 1998; Chopra, Castagna, 2014) и инверсионных преобразований (Russel, 1988; Ампиров и др, 2009, 2011) волнового поля, развиваются и подходы азимутального анализа (Ruger A., 1997, 2014; Jenner E., 2002; Tsvankin I., 2010, 2012; Bachrach R., 2014) и анализа рассеянной компонент (Ланда, 2013) – методы, позволяющие прогнозировать как структурные особенности разреза разного масштаба, так и насыщение, и распределение коллекторов в разрезе.

Таким образом, актуальность работы обусловлена нечасто возникающим совпадением «спроса и предложения»: растущим интересом к исследованию строения и перспектив нефтегазоносности доюрского комплекса, с одной стороны, и прогрессом в области

инструментального и методического развития сейсморазведки, с другой.

### **Цель исследований**

Создание методики динамического анализа сейсмических данных для исследования строения и перспектив нефтегазоносности доюрского комплекса на примере Нюрольской структурно-фациальной зоны Западной Сибири.

### **Основные задачи**

1. Проследить площадное распределение интервала коры выветривания по доюрскому комплексу методами кинематической и динамической интерпретации волнового поля;
2. Установить возможности сейсмической инверсии для целей исследования строения и свойств доюрского комплекса;
3. Обосновать возможности прогноза нефтегазоносности и особенностей строения верхней части доюрского комплекса при помощи динамических характеристик сейсмических данных.

### **Объект и предмет исследования**

Строение и нефтегазоносность доюрского комплекса в пределах Нюрольской структурно-фациальной зоны Западной Сибири

### **Научная новизна работы**

1. Создана новая методика, позволяющая изучить интервал коры выветривания по доюрскому комплексу по сейсмическим данным в площадном распределении. В отличие от существующих методов, выделение коры выветривания, прогнозирование и анализ ее мощности и свойств выполняется не только в точках скважин или в областях большой мощности интервала, но и в областях, где мощность коры выветривания доюрского комплекса не превышает разрешающей способности сейсмической записи.
2. Выявлен диагностический признак выделения коры выветривания доюрского комплекса по сейсмическим данным в пределах Нюрольской структурно-фациальной зоны Западной Сибири – наличие угленосных пластов, непосредственно перекрывающих кровлю коры выветривания.
3. Сформулированы возможности и ограничения сейсмической инверсии для изучения доюрского комплекса. Отличительной особенностью анализа является широкий спектр методических подходов: проведение традиционной детерминистической инверсии по синтетическому волновому полю; исследование различных подходов к построению низкочастотной фоновой модели для целей традиционной детерминистической инверсии, основанной на модели; проведение

нетрадиционной детерминистической синхронной инверсии литотипов и упругих свойств – Ji-Fi инверсии.

4. Определена возможность выделения блокового строения доюрского комплекса по данным рассеянной компоненты, которая показала лучшие результаты относительно классических структурных атрибутов.

5. Методика совместного анализа сейсмических атрибутов, рассеянной компоненты и интенсивности анизотропии впервые применена в пределах Томской области Нюрольской структурно-фациальной зоны Западной Сибири с целью исследования нефтегазонасности интервала доюрского комплекса. Поскольку рассеянная компонента несет в себе информацию как о крупных, так и о небольших структурных неоднородностях, совместный анализ с азимутальными атрибутами в пределах площади позволяет выделить наиболее перспективные зоны.

#### **Теоретическая и практическая значимость исследований**

Разработанная методика анализа коры выветривания доюрского комплекса позволяет проследить этот интервал по сейсмическим данным и спрогнозировать его мощность вне зависимости от общей мощности интервала. Предложенные методы и подходы анализа динамических характеристик волнового поля, рассеянной компоненты и азимутальных атрибутов позволяют спрогнозировать нефтегазонасность и структурные особенности верхней части доюрского комплекса. Подходы опробованы на материалах месторождений Томской области в Западной Сибири и показали свою эффективность.

#### **Методология и методы диссертационного исследования**

1. Обобщение и анализ геолого-геофизической информации об изученности и строении исследуемых участков в пределах Нюрольской структурно-фациальной зоны;

2. Моделирование волнового поля по скважинным данным для исследований влияния изменения мощности коры выветривания на сейсмический куб и соответствующие атрибуты, влияния мощности угленосных пластов на AVO-атрибуты;

3. Обобщение полученной информации для формулировки методики выделения коры выветривания доюрского комплекса по сейсмическим данным;

4. Исследование алгоритмов традиционной детерминистической инверсии, основанной на модели, и синхронной инверсии литотипов и упругих свойств (Ji-Fi) для изучения доюрского комплекса;

5. Описание динамических особенностей сейсмических полей, в том числе и азимутальных характеристик и рассеянной компоненты, с привлечением современных методов интерпретации.

#### **Защищаемые научные положения**

1. Выделение зон распространения коры выветривания доюрских отложений и прогноз ее мощности возможен на основе предложенной методики динамического анализа волнового поля, включающей идентификацию угольных пластов в подошвенной части осадочного чехла с помощью AVO-анализа.

2. Результаты инверсионных преобразований позволяют осуществить прогноз вещественного состава верхней части доюрского комплекса, включающей толщу коры выветривания, в интервале первых десятков метров.

3. Методика совместного анализа рассеянной компоненты, атрибутов азимутального AVO-анализа и динамических характеристик волнового поля позволяет спрогнозировать предполагаемые области улучшенных коллекторских свойств в верхней части доюрского комплекса, а также по результатам анализа энергии рассеянной компоненты определить границы элементов его блокового строения.

#### **Апробация и степень достоверности результатов**

Достоверность результатов демонстрируется на синтетических и реальных данных. Полученные результаты согласуются с данными, представленными в независимых литературных источниках по данной тематике, а также с материалами других геофизических методов.

Основные тезисы и результаты диссертационной работы представлены на геологических обзорах по проекту «Палеозой» ООО «Газпром-нефть» в 2021 и 2022 гг. Основные положения и результаты представлены на конференциях: 2-я международная конференция EAGE «ПроГРРесс», Сочи, 2021; 1-я научно-практическая конференция «Байкал-Гео», Иркутск, 2022.

#### **Публикации**

Основные научные результаты диссертации представлены в 5 статьях. Из них 3 опубликованы в реферируемых научных журналах, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ. Также зарегистрирован патент на научное изобретение.

#### **Личный вклад автора**

Автор принимал участие в научно-исследовательском проекте «Палеозой» в 2020–2022 гг, в рамках которого исследовался доюрский комплекс Западной Сибири и были созданы научно-методические руководства по различным направлениям исследований. Практически вся работа над диссертацией выполнена самостоятельно. Автором был

проведен весь анализ коры выветривания доюрского комплекса, включая моделирование клина по скважинным данным, прогноз угленосных пластов методами AVO-анализа, моделирование и анализ чувствительности сейсмических атрибутов на изменение мощности коры выветривания и последующая систематизация полученных результатов в методику. Также и весь анализ сейсмической инверсии – от тестирования и построения низкочастотной фоновой модели до синхронной инверсии литотипов и упругих фаций (Ji-Fi инверсии) и последующего анализа. Также соискателем выполнен анализ сейсмических и азимутальных атрибутов, рассеянной компоненты с целью выделения структурных особенностей и нефтегазоносности. Соискателем сформулированы основные выводы и положения, выносимые на защиту. Во всех опубликованных работах вклад автора является определяющим. Автор принимал активное участие в постановке научных задач, создании методики исследований, выполнял технические расчеты и анализ полученных материалов, принимал участие в написании текста и оформлении результатов.

#### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав и заключения, изложенных на 118 страницах, включает 85 рисунков, 3 таблицы. Список литературы содержит 139 наименований.

#### **Благодарности**

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю к.г.-м.н. доценту Шалаевой Н.В. за колоссальную помощь при написании диссертации. Соискатель работы благодарит к.г.-м.н. Грабовскую Ф.Р. (ООО «Газпром Технологические партнерства»), Савченко К.А., Иванову А.А., Зелезняк Ф.Ф., Королева А.Е, Волкова Р.П., Смирнову Е.С., Иванову О.В., Резникову А.Н. (ООО «ПетроТрейс»), Коношонкина Д. (Томский политехнический университет) за помощь в процессе написания работы. Особую благодарность выражает к.ф.-м.н. Яковлеву И.В. за веру, поддержку, мудрые советы и свежие взгляды в процессе выполнения и написания работы.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **Введении** сформулированы актуальность, цели и задачи исследования.

#### **Глава 1. Условия формирования отложений доюрского комплекса**

В главе 1 представлен обзор геологического строения доюрского комплекса Ньюрольской структурно-фациальной зоны, его



формационный состав (Виноградов, 1969; Конторович, 1991; Запивалов, Исаев, 2010; Luneva, 2016).

Описывается строение, формирование и формационный состав коры выветривания доюрского комплекса. Большинство исследователей придерживается мнения, что на территории Томской области время их образования приурочено к пермо-триасу (Васильева и др. 1986; Курбала, 1990; Исаев, 2010; Ковешников, 2012). А основными физико-химическими процессами, протекающими при формировании коры выветривания (КВ), являются: гидратация, выщелачивание, гидролиз, дегидратация, обменные процессы, окисление<sup>1</sup>.

На основе литологического расчленения доюрского разреза скважин, описаны 8 типов формаций отложений ДЮК. В работе исследование проведено на примере участков, сложенных разнообразным формационным составом: карбонатные, магматические, терригенные, карбонатно-кремнистые органогенные породы и сланцы.

## **Глава 2. Прогноз свойств коры выветривания**

По генетическому типу различают два типа КВ: остаточные не перемещенные и переотложенные продукты выветривания. В настоящем исследовании под термином КВ рассматриваются оба генетических типа без акцентирования внимания на литохимическом составе и структурно-текстурных особенностях данного типа отложений. В более широком смысле КВ как объект исследования – это промежуточный комплекс с отличными свойствами как от подстилающих пород коренного основания, так и от перекрывающих отложений осадочного чехла.

В разделе 2.1 представлено построение моделей клина. Исследования проводились на основе одномерного моделирования синтетической сейсмограммы нулевых удалений по данным акустического и плотностного каротажа с использованием статистического импульса, оцененного на этапе сейсмостратиграфической привязки.

Для моделирования отобраны 28 скважин с необходимыми данными ГИС, а также разнообразным составом коренного доюрского комплекса, представленного всеми видами встречающихся отложений в пределах исследуемого участка. Далее для каждой скважины по данным акустического и плотностного каротажа построены модели

---

1. Кашик С.А. Физико-химическая теория образования зональности в коре выветривания. Новосибирск: Наука, 1978. 256 с.

клина с изменением мощности коры выветривания в диапазоне от 0 до 150 метров. Модели клина для всех изученных скважин можно разделить на 3 группы, каждая из которых характеризуется своими особенностями поведения сейсмического отклика (Рис. 1).

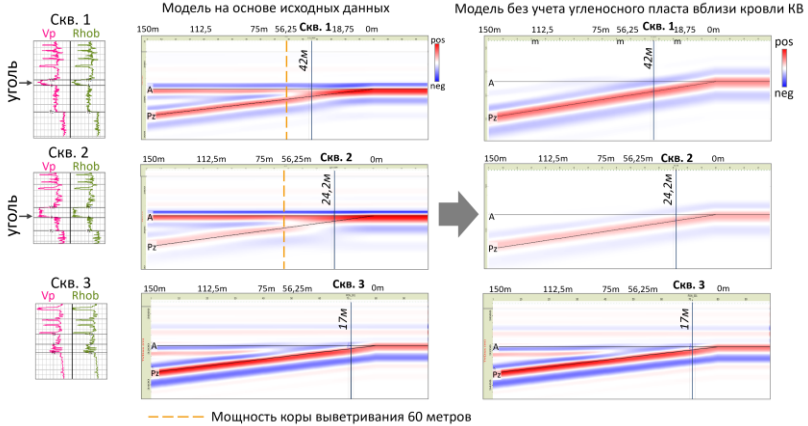


Рис. 1 Моделирование изменения мощности коры выветривания: три характерные модели клина

Модель 1. При увеличении мощности коры выветривания формируются два положительных отражения: от коры выветривания и от кровли коренного палеозоя примерно равные по энергии амплитуд. В случае описанной модели скважины 1 на рисунке 1 наблюдается большой контраст в упругих свойствах между юрскими отложениями, корой выветривания и коренным доюрским комплексом.

Модель 2. При увеличении мощности коры выветривания формируются два положительных отражения, но интенсивность отражения от коры выветривания сильнее, чем от кровли коренного палеозоя, что связано с тем, что контрастность упругих свойств на границе нижней юры и коры выветривания выше, чем на границы КВ и коренного палеозоя (скважина 2 на рис. 1).

Модель 3. Отражение от коры выветривания практически не образуется, наблюдается только отражение от кровли коренного палеозойского комплекса. В данном случае контраст скорости и плотности отложений коры выветривания и нижней юры практически отсутствует (скважина 3 на рис. 1).

В результате анализа всех моделей клина была определена минимальная мощность коры выветривания, при которой наблюдается разделение отражений от коры выветривания и кровли палеозоя, она составила 60 метров.

Анализ вариаций амплитуд отражений этих моделей клина описан в **разделе 2.2** В условиях малой мощности коры выветривания формируется единое отражение от КВ и коренного палеозоя, в связи с чем проследить границы интервалов фактически невозможно. Можно выявить следующую закономерность: повышение интенсивности отражения фактически соответствует уменьшению мощности КВ вплоть до полного отсутствия интервала КВ. При этом при переходе через установленное ранее граничное значение мощности КВ в 60 метров наблюдается относительное понижение значений амплитуд.

Анализ моделей клина, которые построены по реальным скважинам натолкнул на размышления о влиянии перекрывающих угленосных пластов в подошвенной части осадочного чехла, то есть вблизи кровли коры выветривания, на отражение от КВ: в скважинах, в которых угленосные пласты отсутствовали, отражение от кровли коры выветривания не формировалось, даже при увеличении ее мощности. В связи с этим для всех скважин, в которых выделены угленосные пласты, были построены модели клина с отсутствием этих отложений вблизи кровли КВ и проанализированы амплитуды отражений.

При рассмотрении графиков зависимости амплитуды от мощности КВ на кровле палеозоя для модели с отсутствием нижнеюрского угленосного пласта прослеживается интересная особенность: при отсутствии «контрастного маркера» в виде углей нижней юры вблизи коры выветривания доюрского комплекса в волновом поле наблюдается только отражение от коренного палеозоя, отражение от кровли коры выветривания не формируется. Динамически изменение интенсивности отражения никак не связано с мощностью коры выветривания, в данном случае, оно несет в себе информацию о составе коренного палеозоя.

Для понимания возможностей динамического анализа волнового поля при анализе коры выветривания доюрского комплекса в области ее малых мощностей (до 60 метров) проведено 2D моделирование, которое представлено в **разделе 2.3**. Модель строилась по реальным скважинным данным, в которых при однородном составе коренного палеозоя мощность коры выветривания убывает от 41,93 м до полного отсутствия.

По полученным синтетическим разрезам рассчитаны различные амплитудные и частотные атрибуты для целей поиска атрибутов, которые реагировали и диагностировали изменение мощности коры выветривания. Моделирование по псевдолинии 2D позволило выделить наиболее информативные атрибуты, чувствительные к

изменению мощности коры выветривания в области малых толщин, где отражение от кровли КВ и кровли ДЮК не разделяется.

В **разделе 2.4** представлен анализ для прогноза углей по сейсмическим данным, а именно использование методики AVO-анализа<sup>2</sup> (Amplitude Variations with Offset), так как угленосные отложения характеризуются как AVO-аномалии 4-го класса (Peng, 2005; Воскресенский, 2005; Ma, 2008; Fan, 2011; Kim, 2019; Xi, 2022).

Для понимания как на данной площади ведут себя отражения с удалением и соответствующие AVO-атрибуты от пластов с углем, проведено два этапа моделирования, включающие в себя:

- моделирование на основе реальных замеров скважин по синтетической 2D линии;
- анализ синтетических AVO-атрибутов для угленосных пластов разной мощности, которые были синтезированы на примере одной скважины.

На первом этапе моделирования рассчитаны линии синтетических AVO-атрибутов интерсепта и градиента. Полученные области аномальных значений коррелируют со скважинными данным. Также выявлено ограничение в мощности угленосных пластов – угленосные пачки мощностью менее 5 метров не выделяются по данным сейсморазведки<sup>3</sup>.

Второй этап моделирования отвечает на вопрос: а как же будут меняться сами кроссплоты в зависимости от мощности анализируемого угленосного пласта. Для этого проведено моделирование изменения мощности угленосного пласта в вариациях: полное отсутствие углей, 5 метров, 10 метров, 20 метров, 40 метров и 80 метров. На втором этапе моделирования угленосные отложения мощностью менее 10 метров выделялись неуверенно.

Таким образом, угленосные отложения характеризуются 4-м классом AVO аномалии и использование AVO-анализа позволяет получить прогнозную карту распространения угленосных отложений.

В ходе исследования разработана блок-схема для анализа коры выветривания по сейсмическому волновому полю, описанная в **разделе 2.5**. Базовым материалом для анализа коры выветривания являются: информация по скважинам; прогнозная карта вероятности

2. Castagna J. P., Backus M. M. (ed.). Offset-dependent reflectivity—Theory and practice of AVO analysis. – Society of Exploration Geophysicists, 1993.

3. **Ахиярова Е.Р.**, Шалаева Н.В. Применение AVO-анализа для выделения угольных пластов нижнеюрских отложений Западной Сибири при изучении коры выветривания доюрского комплекса // Геофизика. 2022. №3. С. 62 – 70. RSCI (0,56 п.л., авторский вклад – 90%). Импакт-фактор РИНЦ 2021: 0,34.

наличия угленосных пластов вблизи кровли КВ; концептуальная модель строения исследуемого участка, содержащая информацию о площадных вариациях формационного состава коренного палеозоя и позволяющая оценить его однородность.

В **разделах 2.6 и 2.7** приведен анализ реальных данных. При работе с реальными данными, во-первых, необходима информация по скважинам, чтобы понимать состав и вскрытые мощности КВ в точках скважин. Во-вторых, необходима корректная корреляция отражающих горизонтов по сейсмическим данным. В областях увеличения мощностей коры выветривания свыше 60 метров, появляется возможность корреляции двух независимых отражений от кровли коренного палеозоя, и от кровли КВ. Имея две карты изохрон, появляется возможность получения карты временной мощности коры выветривания. Полученный прогноз имеет ограничение, поскольку при мощности интервала КВ менее 60 метров отражение интерференционное и временная мощность будет нулевая.

Также необходимо использовать атрибуты, которые были выделены как информативные на этапе 2D моделирования. С их помощью можно оценить изменение мощности КВ на качественном уровне вне зависимости от ее мощности, а особенно в областях малых толщин, менее 60 метров. При наличии достаточной статистики по скважинам, используя регрессионную зависимость с атрибутами появляется возможность получить прогнозную карту мощности КВ. В **разделе 2.8** сформулированы основные выводы по второй главе.

### **Глава 3. Сейсмическая инверсия**

В **разделе 3.1** приведены теоретические основы сейсмической инверсии. В **разделе 3.2** описаны ограничения инверсионных преобразований в доюрском комплексе. При изучении ДЮК можно выделить ряд особенностей, которые необходимо учитывать при проведении сейсмической инверсии. Во-первых, это глубина вскрытия скважин – чаще всего это небольшой интервал вблизи кровли ДЮК, около 50–100 метров, за редким исключением глубоких скважин, которые могут достигать 300–1000 метров глубиной.

Помимо скважинных данных сложности встречаются и со структурным каркасом. Необходима корректная корреляция кровли ДЮК, по возможности, кровли коры выветривания, а также границ внутри самой толщи доюрского основания. С последним, собственно, и возникают проблемы, поскольку волновое поле внутри ДЮК динамически слабо выражено и проследить, отражающие горизонты внутри интервала практически невозможно, что также оказывает

влияние на построение исходной низкочастотной фоновой модели в доюрском комплексе.

В-третьих, контраст акустических свойств между угленосными пластами нижней юры и доюрского комплекса достаточно велик – достигает  $10\ 000\text{--}11\ 000\ \text{Н}\cdot\text{с}/\text{м}^5$ . При этом для проведения сейсмической инверсии необходимо задавать величину доверительного интервала, внутри которого алгоритм ищет решение относительно исходной фоновой низкочастотной модели (НФМ). Проблема заключается в том, что при построении НФМ модель сглаживается до низких частот, которых нет в сейсмической записи, тем самым сглаживая контраст на границе юры и ДЮКа до средних значений. Задавая в настройках расчета инверсии «коридор» для вариации акустического импеданса, который вряд ли будет превышать  $2000\ \text{Н}\cdot\text{с}/\text{м}^5$ , мы уже заранее полагаем, что ни абсолютные значения угленосных пластов, ни абсолютные значения доюрского основания вблизи кровли восстановлены не будут.

Четвертой важной особенностью является качество сейсмических данных. Для целей синхронной инверсии важно иметь достаточно широкий диапазон удалений для хорошего восстановления сдвигового импеданса и, если углы превышают  $30\text{--}35$  градусов, плотности.

В разделе 3.3 представлены результаты акустической инверсии по синтетическим данным. В рамках работы над проектом выполнено полномасштабное моделирование сейсмического поля для целей исследования доюрского комплекса. Сейсмогеологическая модель, на основе которой проведено моделирование, представляет собой 4 наиболее типичных вида разреза, которые встречаются на двух исследуемых в рамках этой работы площадях в пределах Нюрольской структурно-фациальной зоны (рис. 2, а): карбонатный разрез с локальными внедрениями глинисто-известковой породы; интрузивы кислого и основного состава, а также кислые эффузивы. В модели скважины 3 также выделяется интервал коры выветривания ДЮК. В моделях скважин 2, 3 и 4 разные отложения доюрского комплекса перекрывают друг друга, в скважине 1 кислые интрузивы представляют собой монолитное локальное внедрение.

В ходе моделирования на основе описанной модели получены синтетические данные, по которым автором настоящей работы проведена традиционная акустическая инверсия. Поскольку низкочастотная фоновая модель является критическим аспектом для результатов инверсии, то для целей инверсии были протестированы различные подходы к построению модели (рис. 2, б).

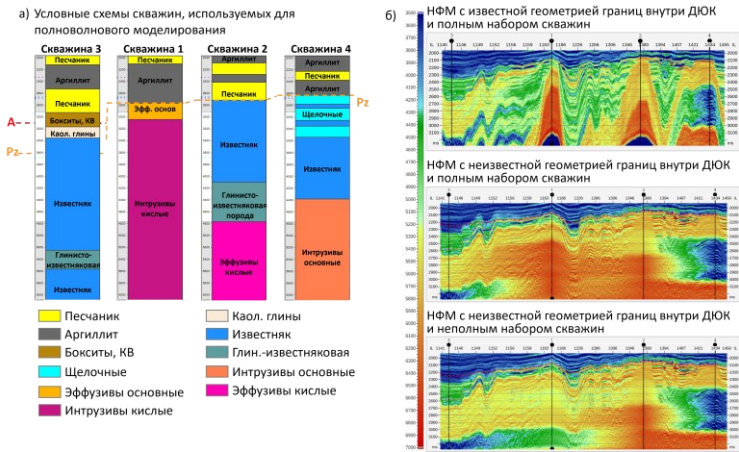


Рис. 2 Инверсия по модельным данным: а) типы разрезов сейсмогеологической модели для моделирования волнового поля; б) результаты инверсии по модельным данным для разных априорных низкочастотных моделей (НФМ)

- Первый вариант представляет собой идеальную ситуацию – известны и откартированы границы внутри комплекса ДЮК и в построении априорной низкочастотной модели задействован полный набор скважин, вскрывающий различные виды формаций;
- Второй вариант представляет собой более реальную картину – прослежена только кровля доюрского комплекса, отражающие границы внутри ДЮК неизвестны, при этом для построения НФМ также используется полный набор скважин;
- И третий вариант инверсии наиболее характерен для нашей работы – для низкочастотной фоновой модели прослежена только граница доюрского комплекса, как и во втором варианте НФМ, при этом для построения модели используется неполный набор скважин. Скважина 1, вскрывшая кислые интрузивы, остается «слепой», предполагая, что в реальных условиях не все объекты исследованы бурением.

В ходе моделирования сформулированы дополнительные ограничения сейсмической инверсии в доюрском комплексе. Во-первых, важность наличия корреляция внутри толщи ДЮК, поскольку невозможно локализовать объекты внутри интервала только по сейсмическим данным. При этом, если объект не исследован скважинами, то вероятность его локализации по исключительно сейсмическим данным низка. Описанные выше ограничения касаются напрямую только коренного палеозоя, верхняя часть доюрского

комплекса, включая интервал КВ, восстанавливается по сейсмическим данным уверенно и позволяет анализировать верхнюю часть толщи.

В **разделе 3.4** показаны результаты традиционной детерминистической инверсии, основанной на модели. Для построения низкочастотных априорных моделей протестировано несколько различных подходов и для каждой модели рассчитана акустическая инверсия с одинаковыми оптимальными параметрами для их последующего сравнения<sup>4</sup>.

Низкочастотные фоновые модели построены: с учетом отражающего горизонта, приуроченного к яркой амплитудной пачке в толще коренного палеозоя и без; с сохранением контраста на границе юрских и доюрских отложений и без сохранения; с общим сглаживанием до низкочастотной составляющей. Опробованы попытки использовать глубинно-скоростную модель (ГСМ), полученную по результатам глубинной миграции, как основу низкочастотной модели. Также построена статистическая НФМ по осреднённым данным скважин. Модели строились стандартным методом интерполяции данных скважин, и одна модель построена методом интерполяции с дополнительным трендом скоростей ГСМ для учета латеральной неоднородности в связи с редкой сетью скважинных наблюдений.

При сравнительном анализе полученных акустических импедансов установлено, что оптимальным подходом к построению априорной модели является сохранение контраста на границе ДЮК и нижнеюрских отложений. При наличии корректной скоростной модели, в данном исследовании полученной на этапе глубинной миграции, учет этих скоростей как тренд при интерполяции скважинных данных. Это важно, потому что классический подход интерполяции не учитывает латеральные изменения упругих свойств, которые на данных площадях свойственны в виде внедрений магматических пород, когда как корректная скоростная модель, которая строится на основе сейсмических данных, эту информацию в себе несет.

Поскольку по результатам предыдущих этапов инверсионных преобразований выявлена критически важная роль НФМ, в **разделе 3.5** рассчитана синхронная инверсия литотипов и упругих свойств  $J_i$ - $F_i$ , в которой построение априорной модели не требуется. Вместо нее

---

4. Ахиярова Е.Р. Методические подходы к построению низкочастотной модели для целей сейсмической инверсии в интервале доюрского основания Западной Сибири // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2022. № 4. С. 131–137. RSCI (0,44 п.л.). Импакт-фактор РИНЦ 2021: 0,596



строятся глубинные тренды изменения упругих свойств для каждой выделенной фации<sup>5</sup>. Полученные акустические импедансы по обоим видам инверсии близки. При этом на акустическом импедансе, полученном по результатам традиционной инверсии, прослеживается сильное влияние исходной фоновой модели, особенно в областях с малым количеством скважин. В доюрском комплексе в интервале глубинного коренного палеозоя упругие свойства что по одной, что по другой инверсии восстанавливаются не очень хорошо. Стоит отметить, что восстановление вблизи кровли ДЮК, где большой контраст импедансов относительно угленосных пластов в нижней юре лучше в Ji-Fi инверсии, чем в традиционной даже с сохранением контраста.

Отличительной особенностью Ji-Fi инверсии является получение куба наиболее вероятной литологии. Следует обратить внимание на распространение фаций угленосных пластов и КВ доюрского комплекса (рис. 3). Выделенные литологические фации подтверждаются пробуренными скважинами.

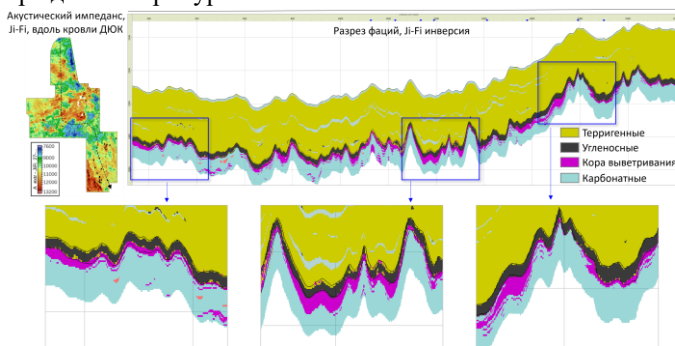


Рис. 3 Сечение куба наиболее вероятных литотипов по Ji-Fi инверсии

Выше указывалось, что корреляция кровли ДЮК (отражающий горизонт А) не всегда соответствует кровле коренного палеозоя или кровле коры выветривания за счет интерференции отражения при малых мощностях. Это хорошо видно и на разрезе куба литотипов: кора выветривания (розовая фация на разрезах) в зонах малой мощности выделяется выше и ниже ОГ А, а при увеличении мощности, граница между интервалами проходит ровно по границе фации КВ. При этом хорошо выделяются области повышенных значений коры выветривания в межскважинном пространстве, что коррелирует с общим представлением о развитии этого интервала на площади.

5. Kemper, M., and J. Gunning, Joint impedance and facies inversion — Seismic inversion redefine // First Break, 32, no. 9, 2014, 89–95.

В разделе 3.6 сформулированы основные выводы, полученные в рамках исследования сейсмической инверсии при изучении доюрского комплекса.

#### **Глава 4. Прогноз особенностей строения верхней части доюрского комплекса**

ДЮК – весьма сложный комплекс и по формационному составу, и по тектоническому блоковому строению, поэтому при его изучении невозможно ограничиваться стандартными подходами к исследованиям<sup>6</sup>. Преимущественно трещинно-поровый коллектор и сложная активная тектоника являются важными условиями для применения методик Amplitude Variations with Azimuths (AVAZ) и Diffraction Imagine (DI) анализа. В разделе 4.1 приведены теоретические основы методов AVAZ- и DI-анализов.

Анализ изменения амплитуд с удалениями в зависимости от азимута – AVAZ-анализ, является надежным методом для описания характеристик трещиноватых коллекторов (Rüger A., 1997, 2014; Jenner E., 2002; Воскресенский, 2002, 2005, 2006; Tsvankin I., 2010, 2012; Hunt L., 2011; Bachrach R., 2014). Основной физической причиной успеха метода является высокая чувствительность изменяющегося по азимуту коэффициента отражения к соответствующим параметрам анизотропии. Объединение параметров анизотропии с информацией, полученной из сейсмических данных, и их совместная интерпретация может обеспечить лучшее понимание распространения трещиноватости.

Помимо анизотропии, для прогноза трещиноватости используются данные о дифрагированной волне, что дополняет уже ставшие традиционными сейсмические характеристики и повышает интерпретационную ценность сейсмических данных. Средне- и мелкомасштабные структурные детали, и неоднородности среды, такие как разломы, карсты, трещиноватость играют ключевую роль в поисках и разработке нетрадиционных резервуаров нефти и газа. Они порождают дифрагированные волны, которые несут в себе информацию о рассеивающих объектах (Уфимцев, 1962; Клем-Мусатов, 1980; Fomel, 2007; Ланда, 2008, 2013; Kozlov, 2009; Klokov, 2010, 2011).

Использование таких волн для обнаружения, идентификации и описания мелкомасштабных неоднородностей весьма затруднено из-за

6. Савченко К.А., Ахиярова Е.Р., Грабовская Ф.Р. Региональные закономерности нефтегазоносности доюрского комплекса на примере Томской области и Ханты-Мансийского автономного округа // Геофизика. 2022. №6. С. 48 – 57. RSCI (0,63 п.л., авторский вклад – 30%). Импакт-фактор РИНЦ 2021: 0,34.

слабой интенсивности дифракционной компоненты волнового поля и сильной интерференции с зеркальными отражениями, маскирующие дифракции<sup>7</sup>. Усиление дифракционной компоненты и ее выделение из полного поля становится ключевой задачей при использовании дифракции для поиска и описания мелкомасштабных элементов среды.

В разделе 4.2 представлен AVAZ- и DI-анализ реальных сейсмических данных и их сравнение со скважинами. Автором настоящей работы и его коллегами было выдвинуто предположение, что скважины, выявившие зоны поглощения, в процессе дальнейшей эксплуатации будут иметь более высокие дебиты и, соответственно, представлять перспективу. Для оценки этой гипотезы обработаны данные по добыче скважин месторождения участка В. Области повышенной интенсивности анизотропии коррелируют с расположением высокодебитных скважин. Это является важным выводом, поскольку поглощение во время бурения может маркировать зоны повышенной трещиноватости.

Аномалии, связанные с повышенной энергией рассеянной компоненты, а также спектральное разложение рассеянной компоненты (рис. 4) являются как индикаторами локальных неоднородностей, так и индикаторами границ блоков.

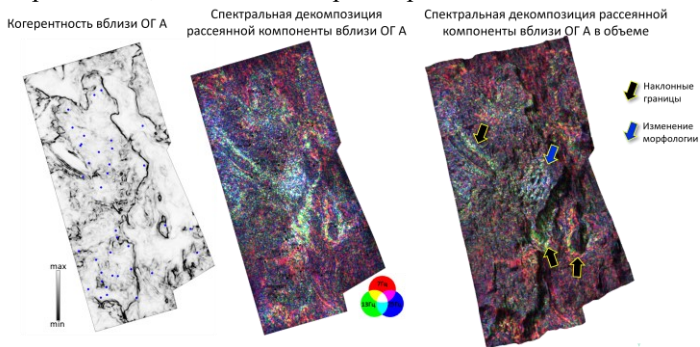


Рис. 4 Карта когерентности и спектральной декомпозиции рассеянной компоненты вблизи кровли доюрского комплекса участка В

На дирекционных сейсмограммах на контактах крутопадающих границ, вблизи кровли ДЮОК, и внутри коренного палеозоя выделяется повышенная интенсивность рассеянной компоненты, приурочена к особенностям тектонического строения. Вблизи кровли доюрского комплекса выделяются несколько крупных аномалий: центральная аномалия округлой формы приурочена к зоне смятия – скорее всего

7. Ланда Е. Роль дифракционной компоненты волнового поля при построении сейсмических изображений // Технологии сейсморазведки, № 1, 2013, с. 5–31.

развитие карстовых систем, другие – к разломным нарушениям и границам блоков. При этом на карте спектральной декомпозиции рассеянной компоненты границы блоков выделяются увереннее, нежели при использовании структурных атрибутов, в том числе когерентности. Использование спектральной декомпозиции рассеянной компоненты обусловлено схожим эффектом при спектральном разложении отраженной волны – волновое поле может быть рассмотрено как суперпозиция разночастотных компонент, которые не являются стационарными, а меняются вдоль сейсмической трассы, отражая влияние геологической среды на спектральный состав сейсмической записи.

Большое количество границ блоков, образовавшихся в доплатформенный период, существуют только в толще коренного палеозоя и практически не были вовлечены в движение в платформенную стадию, что хорошо видно на картах атрибута когерентности вблизи кровли доюрского комплекса.

Одним из методов анализа трещиноватости является ДАГ-анализ, который представляет собой методику RGB color blending (Partyka G., 1999; Hendsen J., 2007, 2008; McArdle N.J., 2012). ДАГ-анализ включает в себя совмещенный анализ дифракции (рассеянной компоненты), анизотропии и геометрии горизонта (когерентность), которые окрашиваются при совмещении карт в определенные цвета: геометрия (когерентность) – красным цветом, анизотропия – зеленым, а дифракция (рассеянная компонента) – синим. Необходимо отметить, что все компоненты анализа получаются из разных сейсмических данных:

- анализ рассеянной компоненты базируется на анализе дифракционных сейсмограмм после подавления отраженной волны;
- анализ азимутов и интенсивности анизотропии проводится на базе сейсмограмм отраженной волны и несет в себе информацию об изменении амплитуды с удалением и в зависимости от направления азимута;
- геометрические атрибуты, чаще всего когерентность – это атрибут, полученный по суммированному кубу отраженной волны.

Результатом является обобщенная карта на основе различных подходов, на которой бирюзовым цветом выделены наиболее вероятные зоны повышенной трещиноватости. На участке А наиболее вероятная зона развития трещиноватости приурочена к юго-западной части в пределах карбонатного блока. Скважины, попадающие в перспективные зоны, характеризуются наличием коры выветривания и

повышенными значениями коэффициент пористости, чем скважины того же карбонатного блока, но расположенные севернее аномалии.

Совместно с коллегами из Томского политехнического университета проведено сравнение емкостных свойств в скважинах с DI и AVAZ атрибутами: энергией рассеянной компоненты и интенсивностью анизотропии (рис. 5).

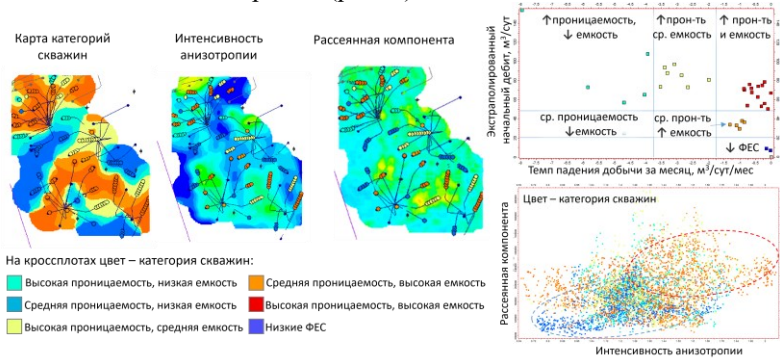


Рис. 5 Сравнение емкостных свойств в скважинах с атрибутами рассеянной компоненты и интенсивности анизотропии (Коношонкин Д, Томский политехнический университет)

На кроссплоте атрибутов точки скважин раскрашены в цвета категорий скважин по качеству фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС): от синих значений низких до красных – высокой проницаемости и емкости. Важным наблюдением является то, что скважины с хорошими параметрами фильтрационно-емкостных свойств плюс-минус распространены широким облаком на кроссплоте, но при этом скважины с низким ФЕС (синие) локализуются только в области пониженных значений атрибутов. Следовательно, можно уверенно выделять области с улучшенными коллекторскими свойствами по высоким значениям рассеянной компоненты и интенсивности анизотропии.

В разделе 4.3 сформулированы основные выводы к четвертой главе и возможностями использования AVAZ- и DI-анализов.

### Заключение

Представленное диссертационное исследование состоит из трех смысловых частей, объединенных общей темой – исследованием доюрского комплекса Нюрольской структурно-фациальной зоны.

Первая часть относится к изучению непосредственно толщи коры выветривания доюрского комплекса. Для исследования динамики отражения от кровли коры выветривания проведено моделирование изменения мощности коры выветривания на основе 28

скважин. При моделировании клина и анализе полученных отражений, выявлен маркирующий горизонт, являющийся важным аспектом формирования отражения от коры выветривания – интервал угленосных отложений вблизи кровли коры выветривания. При отсутствии этого угленосного пласта отражение от кровли коры выветривания формироваться не будет в силу схожести упругих свойств с нижеюрскими отложениями. Поэтому важным этапом изучения коры выветривания является получение прогнозной карты углей в подошвенной части осадочного чехла. Для этих целей возможно использовать AVO-анализ, так как угленосные отложения характеризуются 4 классом AVO аномалии. Возможность использования AVO анализа продемонстрирована на примере моделирований по реальным и синтетическим скважинным данным. Помимо этого, в ходе построений клина найдена качественная зависимость изменения энергии отражения от изменения мощности коры выветривания: интенсивность отражения растет при уменьшении мощности КВ вплоть до его полного отсутствия.

На основе реальных скважинных данных построен сейсмический синтетический профиль 2D, по которому были найдены наиболее информативные сейсмические атрибуты, которые оказались чувствительны к изменению мощности коры выветривания даже в области малых толщин, когда от кровли коры выветривания и от кровли коренного палеозоя формируется единое интерференционное отражение.

Результатом моделирований в первой части работы стала блок-схема для анализа и выделения коры выветривания по сейсмическим данным. При анализе, согласно предложенной методике, появляется возможность корректной корреляции отражающих горизонтов в межскважинном пространстве и возможность получить карты качественных или количественных изменений мощности коры выветривания (**защищаемое положение №1**).

Вторая смысловая часть диссертации посвящена возможности применения детерминистической инверсии, основанной на модели, для целей изучения доюрского комплекса. Применение сейсмической инверсии в исследуемом интервале сопровождается некоторыми ограничениями и имеет ряд особенностей в реализации подхода.

Во-первых, для проведения сейсмической инверсии остро стоит вопрос о качестве исходных данных. Скважины на изучаемом участке преимущественно вскрывают первые десятки метров доюрского комплекса, чего недостаточно для корректного построения низкочастотной фоновой модели. Также участки изучены бурением

неравномерно и преимущественно в зонах поднятий. Результаты акустической инверсии показали, что восстанавливается корректно импеданс только в верхней части доюрского комплекса. Ниже по разрезу полученный импеданс по результатам инверсии повторяет низкочастотную фоновую модель и это также напрямую связано с качеством сейсмического материала на этих глубинах. С качеством сейсмического материала связана и возможность восстановления локальных объектов, не вскрытых скважинами. На примере инверсии с неполным набором скважин для априорной низкочастотной модели, видно, что исходных данных волнового поля недостаточно для того, чтобы восстановить корректный импеданс. Это приводит к тому, что существует большой шанс пропустить локальные неоднородности, в том числе и магматические объекты, которые характеризуются повышенными значениями упругих свойств.

Во-вторых, судя по результатам инверсии по модельным данным, отсутствие прослеженных границ внутри комплекса ДЮК оказывает значительное влияние на результаты – то, что должно было быть локальными объектами, становится пластами за счет интерполяции скважинных данных по каркасу, который представляет собой только кровлю доюрского комплекса.

Третья особенность инверсионных преобразований в доюрском комплексе связана с использованием низкочастотной фоновой модели. Высокий контраст угленосных пластов и доюрского основания при сглаживании априорной низкочастотной модели может не восстанавливаться за счет «коридора отклонения» в настройках инверсии, поэтому необходимо НФМ сглаживать до низких частот используя корреляцию кровли ДЮК – до горизонта и после горизонта, чтобы получилась априорная модель с сохранением контраста импеданса на границе сред. Это позволит корректнее восстановить импеданс вблизи угленосных пластов нижней юры и кровли доюрского комплекса.

Стоит отметить, что использование Ji-Fi инверсии, в алгоритме которой вместо фоновой модели используются тренды изменения свойств с глубиной, показывает лучший результат относительно традиционных подходов: восстановление на контрастной границе между угленосными пластами в подошве юрских отложений и высокоимпедансным доюрским комплексом лучше, чем в традиционной инверсии. Особенно разница между двумя видами инверсии прослеживается в межскважинном пространстве, где от построения низкочастотной фоновой модели в традиционной инверсии зависит многое. А получаемый куб литотипов по результатам Ji-Fi

инверсии позволяет корректно выделить в плане и на сечениях фации углей в нижней юре и коры выветривания доюрского комплекса.

При этом корректно восстановленный импеданс в верхней части доюрского комплекса описывает изменения формационного состава, что показано на примере расчета двух алгоритмов детерминистических инверсий по реальным данным, где выделяются магматические, карбонатные и глинисто-кремнистые отложения (**защищаемое положение №2**).

Третья часть диссертации касается применения методов анализа анизотропии и дифрагированных волн. Доюрский комплекс характеризуется сложным блоковым строением с преимущественно трещинно-поровым коллектором, поэтому применение AVAZ- и DI-анализов является в данном случае весьма актуально.

Атрибуты интенсивности анизотропии и энергии рассеянной компоненты по отдельности несут в себе информацию о строении верхней части доюрского комплекса. Повышенные значения интенсивности анизотропии коррелируют с высокодебитными скважинами, которые связаны с областями повышенной трещиноватости. Использование дирекционных сейсмограмм и энергии рассеянной компоненты показывает лучшие результаты при выделении границ блокового строения, относительно классических атрибутов, рассчитанных по суммарному кубу отраженных волн. Помимо этого, по энергии рассеянной компоненты можно выделить локальные карстовые объекты или границы формационных зон. Карбонатные отложения выделяются повышенными значениями энергии, относительно магматических, терригенных или метаморфических пород.

Но при этом именно методика совместного анализа рассеянной компоненты и интенсивности анизотропии позволяет спрогнозировать предполагаемую нефтегазоносность верхней части доюрского комплекса и выделить области с улучшенными фильтрационно-емкостными свойствами, которые характеризуются повышенными значениями обоих атрибутов (**защищаемое положение №3**).

По итогам исследования создана методика исследования строения доюрского комплекса, изучены подходы к проведению сейсмической инверсии, выработан алгоритм выделения и прогнозирования толщи коры выветривания, а также найдена возможность прогнозирования перспектив нефтегазоносности в верхней части ДЮК. Все описанные исследования вошли в состав научно-методического руководства, написанного в рамках проекта по изучению доюрского комплекса Томской области, и внесли вклад в



планы по геологоразведке и разработке на этих месторождениях. Перспектива дальнейшей разработки темы заключается в апробации сформулированных методик и подходов на примере исследования доюрского комплекса других месторождений по сейсмическим данным.

### **СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:**

#### **Научные статьи, опубликованные в журналах Scopus, WoS, RSCI, а также в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности:**

1. **Ахиярова Е.Р.** Методические подходы к построению низкочастотной модели для целей сейсмической инверсии в интервале доюрского основания Западной Сибири // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2022. № 4. С. 131–137. RSCI (0,44 п.л.). Импакт-фактор РИНЦ 2021: 0,411.

2. **Ахиярова Е.Р.,** Шаласва Н.В. Применение AVO-анализа для выделения угленосных пластов нижнеюрских отложений Западной Сибири при изучении коры выветривания доюрского комплекса // Геофизика. 2022. №3. С. 62 – 69. RSCI (0,56 п.л., авторский вклад – 90%). Импакт-фактор РИНЦ 2021: 0,43.

3. Савченко К.А., **Ахиярова Е.Р.,** Грабовская Ф.Р. Региональные закономерности нефтегазонасности доюрского комплекса на примере Томской области и Ханты-Мансийского автономного округа // Геофизика. 2022. №6. С. 49 – 56. RSCI (0,63 п.л., авторский вклад – 30%). Импакт-фактор РИНЦ 2021: 0,43.

#### **Иные научные публикации:**

4. **Akhiyarova E.,** Savchenko K., Yakovlev I., Grabovskaya F. Research of the DUK Perspectives Using Dynamic Analysis of Seismic Data //ProGREss'21. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2021. – Т. 2021. – №. 1. – С. 1-4.

5. Savchenko K., **Akhiyarova E.,** Grabovskaya F. DUK. A New Vision–New Perspectives. The Methodology of Constructing a Structural-Formation Block Model //ProGREss'21. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2021. – Т. 2021. – №. 1. – С. 1-5.

#### **Патенты и свидетельства:**

Патент на изобретение / Способ определения структурно-тектонического строения погребенного складчатого фундамента с использованием данных сейсморазведки / К.А. Савченко, **Е.Р. Ахиярова,** И.В. Яковлев; правообладатель ООО «Газпромнефть-Восток». - №2022135317; заявл. 30.12.2022; решение о выдаче патента 03.04.2023.