

На правах рукописи



Окуневич Всеволод Станиславович

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ УПРУГИХ
СВОЙСТВ ПОРОД ДОМАНИКОВОЙ ФОРМАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ТЕОРИИ ЭФФЕКТИВНЫХ СРЕД**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

1.6.9. Геофизика

Москва 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН.

Научный Баюк Ирина Олеговна

руководитель: доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории “Фундаментальных проблем нефтегазовой геофизики и геофизического мониторинга” Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук.

Официальные Шпуров Игорь Викторович

оппоненты: Доктор технических наук, генеральный директор Федерального Бюджетного Учреждения Государственной комиссии по запасам полезных ископаемых, заслуженный геолог РФ;

Коровина Татьяна Альбертовна

Кандидат геолого-минералогических наук, заместитель начальника научно-аналитического центра исследований керна ООО «Корэтест сервис» по научной и методической работе.

Ведущая Федеральное государственное автономное образовательное
организация: учреждение высшего образования “Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина”.

Защита диссертации состоится 30 октября 2025 г. в 14 часов на заседании Диссертационного совета 24.1.132.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, по адресу 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФЗ РАН и на сайте института www.ifz.ru. Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при министерстве образования и науки Российской Федерации vak.ed.gov.ru и на сайте ИФЗ РАН.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, в 2-х экземплярах, направлять по адресу: 123242, Москва, Большая Грузинская ул., д. 10, стр. 1, ИФЗ РАН, ученому секретарю диссертационного совета Жосткову Руслану Александровичу.

Автореферат разослан «___» сентября 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук



Р.А. Жостков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время во всем мире растет объем разведочных работ и добычи горючих полезных ископаемых, особенно жидких – нефти. Большинство традиционных месторождений уже открыто и эксплуатируется. Поддерживать рост объемов добычи и разведки только за счёт традиционных месторождений становится с каждым годом труднее, поэтому, в настоящее время, наибольший интерес вызывают месторождения с нетрадиционными коллекторами нефти и газа. Проблема поиска и добычи нефти из низкопористых и малопроницаемых коллекторов основная задача многих ученых в различных областях геологии нефти и газа.

Одним из наиболее перспективных типов нетрадиционных коллекторов в нашей стране можно назвать доманиковые отложения Волго-Уральской и Тимано-Печорской нефтегазоносных провинций (НГП). Данные отложения богаты органическим веществом (ОВ), а также являются нефтематеринскими. Данные отложения могут участвовать в накоплении и миграции жидких углеводородов (УВ). Надежные знания о физических и геологических свойствах таких пород необходимы для их поиска и увеличении объемов добычи нефти из уже известных месторождений с подобным типом коллекторов УВ. Под геологическими свойствами в данной работе понимаются свойства, которые характеризуют внутреннее строение исследуемых горных пород, например, форму минеральных включений и пустот, объем пустотного пространства, степень связности некоторых включений, трещинную пористость и др.

Степень разработанности темы исследований. Доманиковые отложения выделены Кайзерлингом в 1845 г. и названы в честь ручья Доманик, который является притоком реки Ухта [Юдович, 1988]. Данные отложения распространены в восточной части русской платформы. Описанию этой формации посвящено множество работ видных ученых: Н.М. Страхова [1939], С.В. Максимовой [1970], М.М. Алиева [1978], Н.В. Беляевой [1998], М.И. Зайдельсона [1990] и др.

Веществом, представляющим наибольший научный и производственный интерес в составе доманиковых и подобных им отложений, которые относят к нетрадиционному типу коллекторов, является кероген. Его важность обусловлена участием в генерации УВ и их первичной миграции. Кероген является уникальным компонентом в вещественном составе доманиковых отложений, имея очень контрастные физические свойства по сравнению с вмещающими горными породами, формирующими толщи доманиковой формации. Влияние керогена и его строения на упругие свойства керогеносодержащих пород рассмотрено в работах некоторых иностранных авторов: Yan [2013], Yenugu [2013], Li [2015], Dvorkin [2021] и др.

Для решения различных задач промысловой геофизики при поиске, разведке и эксплуатации месторождений нефти и газа с нетрадиционным типом коллекторов, в частности, и для месторождений доманиковых и подобных им отложений, необходимо проводить разномасштабные геофизические исследования. Основой для этих разномасштабных исследований являются математические модели физических свойств исследуемых горных пород, например, петроупругие модели. Петроупругие модели

доманиковых пород должны иметь разномасштабный характер, учитывать особенности состава и микроструктуры породы, в частности, степень зрелости керогена, его пористость, степень связности. На настоящий момент таких петроупругих моделей не существует. Зачастую, используют очень простые петроупругие модели, для описания доманиковых и подобных им отложений, с последующим прогнозом упругих свойств. За счет значительной карбонатной составляющей в составе используют модель Шу-Пейна [Xu, Payne, 2009], которая является неким подобием модели Шу-Уайта [Xu, White, 1996], однако разработанной для карбонатных пород. Нередко применяют саму модель Шу-Уайта к доманиковым отложениям, хотя эта модель разработана для терригенных пород. Самой простой и распространенной моделью, которая используется на практике, является модель “матрица-включение” [Bergrman, 1995], которая не учитывает особенности строения и состава доманиковых и подобных им отложений.

Цель работы

Установление связей между упругими свойствами доманиковых пород и их микроструктурными параметрами для повышения достоверности интерпретации разномасштабных геофизических данных.

Основные задачи исследования

1. Построение базовых петроупругих моделей керогеносодержащих пород доманиковой формации в масштабе керна.
2. Создание разномасштабной модели упругих свойств пород доманиковой формации и оценка влияния на них микроструктурных параметров.
3. Учет анизотропии упругих свойств при построении разномасштабных петроупругих моделей пород доманиковой формации, вызванной различными факторами (ориентированными линзами минералов, керогена, ориентированной трещиноватостью – в микромасштабе, слоистостью – в макромасштабе).
4. Применение методики разномасштабного моделирования на примере реальных скважинных данных.

Научная новизна работы

1. Созданы разномасштабные петроупругие модели пород доманиковой формации, учитывающие различные факторы, влияющие на их упругие свойства, которые включают содержание керогена в породе и его пористость, трещиноватость, степень связности включений керогена в породе.
2. На основе результатов петроупругого моделирования показано, что параметр связности керогена в породе имеет большее влияние на эффективные упругие свойства по сравнению с параметром пористости твердого органического вещества, особенно в случае присутствия в породе твердого органического вещества в виде матрицы.
3. На основе результатов моделирования созревания керогена, показано, что степень изменения упругих свойств получаемого флюида оказывает слабое влияние на упругие свойства пород.

4. Исследовано поведение коэффициентов отражения от керогеносодержащего слоя с учетом различных параметров, определяющих упругие свойства доманиковых пород с учетом их анизотропии.

Методология и методы исследования. Методология исследований, проведенных в данной работе, включала в себя несколько последовательных этапов. Первый этап исследования заключался в анализе имеющихся экспериментальных данных об упругих свойствах и микроструктуре пород доманиковых отложений, полученных на основе изучения фото шлифов коллекции образцов и проведения ультразвуковых исследований на представительных образцах. Второй этап работы относился к построению базовых петроупругих моделей эффективных упругих свойств доманиковых отложений в масштабе керна, которое было проведено с помощью методов теории эффективных сред. Последующий, третий, этап работы диссертационного исследования посвящен разномасштабному моделированию упругих свойств керогеносодержащих отложений, для выполнения которого также использовались методы теории эффективных сред. Все этапы математического моделирования и представления полученных результатов в виде графических приложений были реализованы с помощью программ, разработанных лично автором на языке программирования Python 3.0, и в программном обеспечении Microsoft Excel.

Защищаемые научные положения

1. Содержание керогена в породе, его пористость и степень связности являются определяющими факторами, влияющими на эффективные упругие свойства доманиковых отложений.
2. Данные геофизических исследований скважин и AVO анализа позволяют определять вариации содержания керогена в породе, его пористость и степень связности.
3. Ориентированные трещины в керогене, линзы минералов и переслаивание керогеносодержащих слоев с карбонатными породами порождают анизотропию упругих свойств доманиковых пород, видимую методами геофизических исследований скважин и сейсмическими исследованиями.

Теоретическая и практическая значимость работы. Построенные петроупругие модели доманиковых пород и полученные с их помощью закономерности изменения их упругих свойств могут быть использованы для повышения качества интерпретации данных скважинных и наземных сейсмических исследований.

Результаты данного исследования являются основой для создания методики прогноза упругих свойств доманиковых и подобных им отложений на различных масштабах геофизических исследований не только для улучшения качества интерпретации наземных сейсмических исследований, но и для выделения потенциально-перспективных интервалов для добычи горючих полезных ископаемых.

Созданные анизотропные петроупругие модели доманиковых пород могут быть использованы для создания скоростных моделей, используемых с целью локации микроземлетрясений, возникающих при проведении гидроразрыва пласта.

Достоверность результатов, полученных автором обосновывается следующим.

- 1) В работе использован подход, основанный на методах теории эффективных сред, который на протяжении десятков лет успешно используется в геофизике.
- 2) Построенные автором параметрические петроупругие модели доманиковых пород основаны на результатах экспериментальных работ по измерению скоростей упругих волн на представительных образцах этих пород и определению модулей упругости пористого керогена с учетом степени его зрелости.
- 3) Оценки степени анизотропии упругих свойств доманиковых пород в масштабе геофизических исследований скважин и сейсмических работ, полученные на основе петроупругого моделирования, находятся в интервале значений, наблюдаемых в эксперименте.

Личный вклад автора. Основные результаты работы, полученные лично автором в ходе проведения исследований, включают: петроупругие модели для имеющихся образцов пород доманиковой формации, основанные на методах теории эффективных сред, и построенные на их основе разномасштабные петроупругие модели пород доманиковых отложений; реализацию этих моделей в виде программного кода на языке Python; проведение параметрических исследований моделей (анализа чувствительности).

Апробация работы

Результаты диссертационной работы были доложены на следующих конференциях: VIII Международная геолого-геофизическая конференция и выставка “ГеоЕвразия-2025. Геологоразведочные технологии – наука и бизнес”, Москва, МГРИ, ул. Миклухо-Маклая, 23, 14-16 мая; Наука о сланцах 25. Новые данные, г. Москва, Russia, 7-8 апреля 2025; Петромодель / BalticPetroModel 2024. 8-я научно-практическая конференция, г. Петергоф, Russia, 4-6 сентября 2024; 66-я Всероссийская научная конференция МФТИ, секция Прикладная геофизика, 1-6 апреля 2024; Международная геолого-геофизическая конференция и выставка «ГеоЕвразия-2024. Геологоразведочные технологии - наука и бизнес», Москва, Краснопресненская набережная, 12, Центр международной торговли, Russia, 12-14 марта 2024; Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН, 8-9 ноября 2023; Петромодель / BalticPetroModel 2023. 7-я научно-практическая конференция, г. Петергоф, Russia, 18-21 сентября 2023; Наука о сланцах 23. Новый опыт, г. Москва, Russia, 20-22 марта 2023; Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН, 9-11 ноября 2022.

Публикации

Основные научные результаты и положения диссертации опубликованы в 11 научных работах, включая 3 статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ.

Объем и структура работы

Работа состоит из введения, шести глав, заключения. Содержит 163 страниц текста, 91 рисунок, 12 таблиц, 2 приложения и список литературы из 99 наименований.

Благодарности

Автор выражает искреннюю признательность своему научному руководителю д.ф.-м.н. И.О. Баяк за плотное сотрудничество в течение всего периода проведения данной

работы, за консультации, советы и чуткое отношение, Институту физики Земли РАН за возможность проведения этих исследований и приобретенный опыт работы. Отдельная благодарность к. ф.-м. н. Н.В. Дубине за консультацию и советы в рамках работы, особенно по вопросам геомеханики, к.т.н. Д.А. Данько за консультацию в вопросах разномасштабного моделирования упругих свойств, д.ф.-м.н. С.А. Тихоцкому, д.ф.-м.н. А.В. Пономареву, д.ф.-м.н. А.Д. Завьялову, д.г.-м.н. Г.А. Калмыкову и к.х.н. А.Г. Калмыкову за проявленный научный интерес и ценные комментарии.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и цель настоящей диссертационной работы. Затем сформулированы задачи, защищаемые положения, отражены новизна и практическая значимость исследования.

Первая глава посвящена литературному обзору объекта исследований – доманиковым отложениям. Литературный обзор можно условно разделить на четыре раздела: первый раздел посвящен описанию объекта исследования, а именно, литологическим особенностям состава и строения отложений доманиковой формации; второй раздел посвящен петроупругому моделированию, его базовым понятиям, особенностям и т.д. Третий раздел литературного обзора посвящен определению места петроупругого моделирования в разномасштабном моделировании и способам перехода между различными масштабами геофизических исследований. В последнем разделе обсуждается научная новизна предложенных подходов петроупругого моделирования керогеносодержащих пород доманикового типа в сравнении с другими исследованиями.

В первой части литературного обзора рассмотрены разные трактовки отечественных авторов термина “доманиковые отложения”. В результате анализа литературы можно сделать вывод, что под доманиковыми отложениями понимается несколько разные стратиграфические интервалы, например, это может быть, как отложения только доманикового горизонта верхнего девона, так и целый интервал от верхнего девона франского яруса до нижнего карбона турнейского яруса ($D_3fr - C_{1t}$), некоторые авторы предлагают объединить все горючие сланцы под термином *доманикоиды* на территории Волго-Уральского и Тимано-Печорского нефтегазоносного бассейна (НГБ) [Юдович, 1988]. С точки зрения данного диссертационного исследования, наибольший научно-промысловый интерес представляют породы, которые имеют в своём составе твердое органическое вещество – кероген. Работа посвящена прежде всего исследованию влияния керогена на эффективные упругие свойства промышленно значимых отложений, распространенных на территории вышеупомянутых НГБ. Поэтому в ходе дальнейшего исследования будет использован термин керогеносодержащие породы доманикового типа.

Вне зависимости от различных трактовок данного термина, все авторы сходятся в том, что это кремнисто-карбонатная горная порода, в которой есть органическое вещество: жидкий флюид (нефть) и кероген.

Второй раздел литературного обзора посвящен методам определения эффективных упругих свойств в прикладной геофизике. Наибольшее внимание уделяется методам теории эффективных сред, как главному инструменту диссертационного исследования.

Дается ответ на вопрос, в чем преимущества методов теории эффективных сред и почему именно методы этой теории используется в настоящем исследовании для петроупругого моделирования керогеносодержащих пород доманикового типа. Эти методы можно разделить на две группы: которые не учитывают геометрию включений (форму, ориентацию и степень связности) и которые ее учитывают. Первая группа методов также называется методами, основанными на вариационных принципах. К таким методам относится, в частности, метод Хашина-Штрикмана [Hashin, Shtrikman, 1963] для построения границ, в которых могут находиться модули упругости. Вторая группа методов (учитывающая геометрию включений) основывается на решении Эшелби о поле деформаций в эллипсоидальном включении и теории длинноволнового рассеяния первого порядка, например, методы Кастера-Токсоза [Kuster and Toksoz, 1974] или метод самосогласования Берримана [Berryman, 1980].

Третий параграф посвящен разномасштабному петроупругому моделированию, в частности, описана основная цель проведения петроупругого моделирования на масштабе керна как способа перехода на больший масштаб исследований – ГИС и наземных исследований. Главными интересующими параметрами исследований являются скорости распространения упругих волн (продольных и поперечных), плотность.

В последнем параграфе первой главы приводится сравнительный анализ существующих моделей, которые используются для петроупругого моделирования сложных нетрадиционных коллекторов, к которым относятся доманиковые отложения. В параграфе отмечается, что из-за сложного состава и строения доманиковых отложений для них, на сегодняшний день, не существует петроупругих моделей, учитывающих все их литологические особенности. Таким образом, обосновывается научная новизна данной диссертационной работы.

Вторая глава посвящена начальному этапу исследования – построению базовых петроупругих моделей керогеносодержащих пород доманикового типа. Основой для петроупругого моделирования послужили результаты ультразвуковых (УЗИ), литолого-петрографических и геохимических исследований для коллекции образцов керна. По данным УЗИ анизотропия упругих скоростей на масштабе керна выявлена не была (рис. 1, б). Среда считалась однородной изотропной.

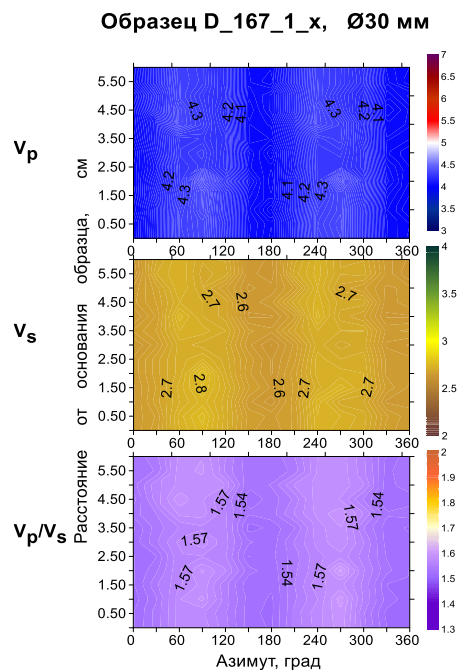
Главной литологической особенностью некоторых образцов была достаточно высокая концентрация керогена в составе образцов (до 10 %) и его конфигурация: для некоторых образцов кероген являлся не изолированным включением, а матрицей (рис. 1, а). Эти литологические особенности необходимо было учесть при создании петроупругой модели.

Важным подготовительным этапом являлось определение упругих свойств компонент, составляющих исследуемые породы. Особенно это касалось самого керогена, так как кероген может иметь очень разные значения упругих модулей и плотности (модуль сжатия K и модуль сдвига μ), например, форма, объемная концентрация и состав заполнителя пор внутри самого керогена значительно влияют на его эффективные упругие свойства. На основе литературных и экспериментальных данных была произведена оценка значений упругих модулей керогена.

Используя данные УЗИ, описание шлифов и результаты геохимических исследований была разработана петроупругая модель и рассчитаны эффективные упругие свойства пород с помощью методов теории эффективных сред. Таким образом, можно говорить о иерархической (или двухэтапной) модели доманиковых отложений: сначала моделировались упругие свойства керогена, а затем они включались в модель породы.



а)



б)

Рис. 1 Фотографии шлифа образца D-167. Основная однородная карбонатная масса породы, насыщенная ОВ (параллельные николи) (а); результаты азимутальных ультразвуковых измерений для образца керна доманиковых отложений D-167 (б).

Достоверность предложенной петроупругой модели обосновывалась приемлемым расхождением, не больше 3 % между модельными значениями скоростей распространения упругих волн и результатами ультразвуковых исследований. В ходе моделирования использовалось несколько методов теории эффективных сред, но наилучший результат, как с точки зрения минимизации разницы между модельными и экспериментальными данными, так и с точки зрения физичности получившейся модели, дал метод самосогласования Берримана [Bergman, 1980].

На завершающем этапе создания базовых моделей, основанных на результатах комплекса петрофизических исследований, была построена сейсмогеологическая модель пласта отложений доманикового типа. Используя разработанную базовую петроупругую модель и методы теории эффективных сред, было спрогнозировано изменение эффективных упругих свойств керогеносодержащих пород доманикового типа на масштабе наземных сейсмических исследований в зависимости от изменения объемной концентрации керогена и его пористости. Такой прогноз является важным при их поиске и разведке углеводородов в керогеносодержащих породах. Переход на масштаб сейсмических исследований заключался в построении синтетических AVO (AVA)-сейсмограмм (рис. 2, 3) для сейсмогеологической модели. Для примера был взят разрез доманиковых отложений Волго-Уральского бассейна [Ступакова, Калмыков, 2017].

Согласно литературным данным, доманиковые отложения залегают между карбонатной постройкой с пористостью 2-3 % сверху и кремнисто-карбонатной толщей с прослоями плотных карбонатов с пористостью также 2-3 %. Данная модель была взята за основу.

На рисунках 2 и 3 представлены примеры синтетических AVO сейсмограмм в зависимости от различного содержания керогена в продуктивном слое (при фиксированной пористости керогена) и различной пористости керогена (при фиксированной объемной концентрации).

Изменение пористости в самом керогене существенно влияет на эффективные упругие свойства керогеносодержащих пород, что отражается и на масштабе наземных сейсмических измерений. Наибольший контраст упругих свойств в масштабе сейсмических измерений наблюдается для обменных волн.

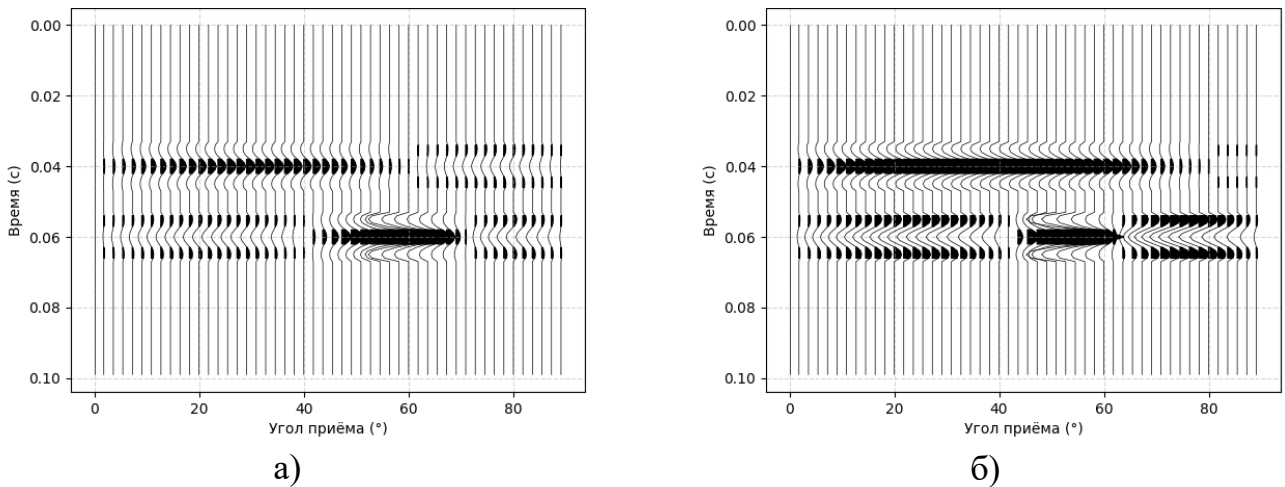


Рис. 2 Пример теоретической AVO-сейсмограммы для сейсмогеологической модели керогеносодержащего пласта доманикового типа для обменных волн (а – пористость керогена 5 %; б – пористость керогена 30 %. Объемная концентрация керогена $\approx 10\%$).

Изменение содержание керогена в слое влияет на изменение волнового поля, что четко видно на сейсмограммах (рис. 3). Контраст наблюдается для обоих типов волн: продольных и обменных.

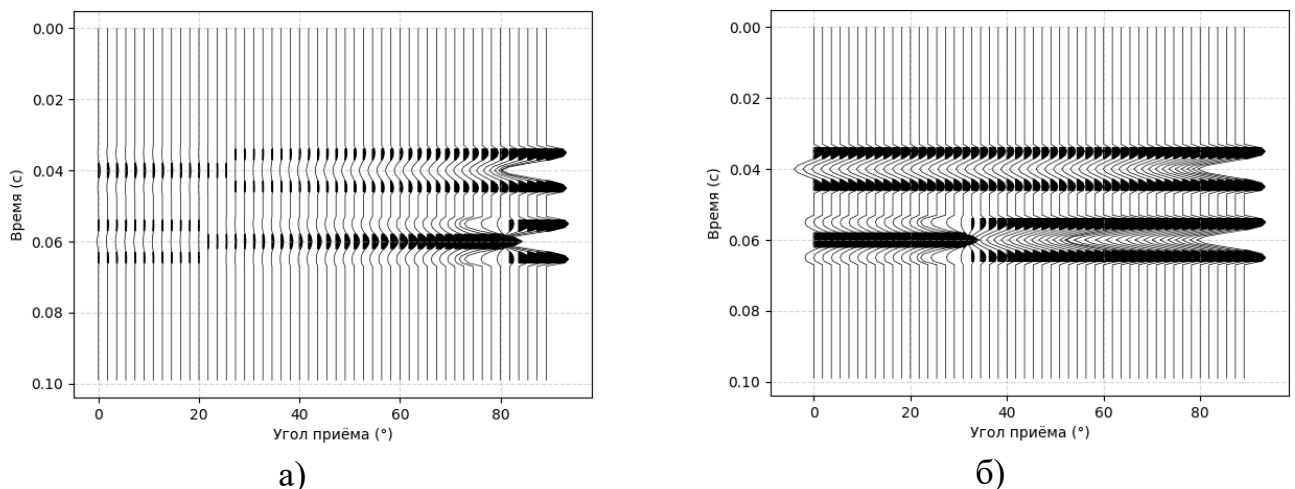


Рис. 3 Пример теоретической AVO-сейсмограммы для сейсмогеологической модели керогеносодержащего пласта доманикового типа для продольных волн (а – концентрация керогена 1 %; б – концентрация керогена 20 %. Пористость керогена $\approx 1\%$).

Изменение параметров, указанных выше, уверенно проявилось и на масштабе наземных сейсмических исследований, что показало значимость вклада керогена в эффективные упругие свойства отложений доманикового типа.

Третья глава развивает вторую главу и посвящена методике и результатам петроупругого моделирования керогеносодержащей породы с трещинами, заполненными нефтью, как следствие созревания керогена. Степень созревания керогена – параметр, представляющий большой промысловый интерес во время поиска и эксплуатации месторождений керогеносодержащих пород. При построении базовых моделей степень созревания моделировалась путем внедрения изометричных пор, насыщенных флюидом, в кероген, то есть, увеличение насыщенной пористости керогена. Однако, увеличение изометричной пористости присуще поздним стадиям катагенеза керогена (МК3-МК4). В начале формируются неизометричные пустоты, которые в рамках этой диссертационной работы будем называть трещинной пористостью. Ориентированная трещинная пористость может вызывать анизотропию упругих свойств изучаемых отложений, что нередко встречается на практике. Важно отметить, что отсутствие трещинной пористости на этапе построения базовых моделей связано с тем, что данный вид пустотного пространства не наблюдался при анализе шлифов коллекции образцов керна, а также отсутствовала анизотропия упругих скоростей, которая могла быть вызвана упорядоченными трещинами, рассматриваемого генезиса. Именно поэтому добавление в базовые петроупругие модели керогеносодержащих пород доманикового типа трещинной пористости важный исследовательский этап.

Моделирование проводилось в два этапа: первый этап – построение границ Хашина-Штрикмана, второй – петроупругое моделирование с учетом геометрии включений: методом самосогласования Берримана с учетом параметра связности включений f [Berezina, Bayuk 2022] для изотропных пород (случай хаотических трещин) и методом Хадсона [1980, 1981], с последующим насыщением трещин нефтью [Gassman, 1951; Brown, Korringa, 1975] для анизотропной среды (случай ориентированных трещин). Данный вариант метода Берримана является аналогом подхода, применяемого в методе обобщенного сингулярного приближения (ОСП) для явного учета степени связности компонент.

При построении границ Хашина-Штрикмана были сделаны некоторые методологические выводы относительно различных подходов к определению границ, а именно представление эффективной среды, как смеси двух типов включений или смеси включений множества компонент. Важный методологический вывод заключается в том, что разница между представлением среды как смеси 2-х компонент или N компонент не существенна.

Метод Хашина-Штрикмана даёт слишком широкий диапазон для значений упругих модулей, в силу чего нельзя ограничиваться использованием только этого метода. Например, значения верхней границы скоростей распространения эффективных упругих волн могут быть в 2-3 раза больше значений скоростей нижней границы. При моделировании границ для породы, содержащей флюидонасыщенные трещины, - границы

еще шире. Это объясняется большим контрастом упругих свойств минеральных включений и керогена, а также флюида (нефти).

Согласно результатам главы 2, необходимо выбрать метод, который учитывает геометрию включений в модели. Как показали результаты петроупругого моделирования керогеносодержащих образцов, представленные в главе 2, наиболее физичные результаты позволяет получить метод самосогласования [Berryman, 1980, 1995]. Однако, при решении данной задачи необходимо учесть фактор созревания керогена и фактор “мягкой” и “жесткой” матрицы. Можно предположить, что по мере созревания керогена образуются трещины, которые расширяются. Таким образом, можно говорить, что замкнутые трещины стремятся к объединению в общую сеть пустотного пространства в породе. Модель “мягкой” матрицы можно описать схожим образом, т.е. матрица – субстанция, которая обволакивает, заключает в себя все остальные включения. Исходя из этих предположений для петроупругого моделирования, необходимо ввести некий параметр связности для конкретного включения – трещин, заполненных флюидом, или керогена. Параметр связности включений, очевидно, должен влиять на эффективные упругие свойства, помимо их (включений) геометрических свойств.

В отличие от метода самосогласования, который учитывает связность включений косвенно, метод обобщенного сигулярного приближения (ОСП) позволяет учесть степень связности включений в явном виде, путем введения специального параметра. Выбор тела сравнения в методе ОСП диктуется особенностями внутреннего строения породы [Баюк, 2013], которые отражаются в выборе, так называемого, тела сравнения (ТС), играющего роль вмещающей матрицы для всех включений породы при построении решения для эффективных свойств. Если связаны между собой все включения самой жесткой компоненты, то она и выбирается в качестве тела сравнения. А если самой мягкой – то в качестве ТС выбирается она. При этом в случае изометричной формы всех компонент, слагающих породу, будут получены верхняя и нижняя границы Хашина-Штрикмана. Однако, могут встречаться и ситуации, когда в породе присутствуют одновременно и связанные и изолированные включения какого-либо (или каких-либо) компонента (компонент). В этом случае можно выбрать свойства ТС в виде линейной комбинации свойств компонент, в которую введен некий параметр, контролирующий эту связность. Вариант метода ОСП (с параметром явного учета связности компонент), основанный на формулах Кастера-Токсоза, рассмотрен в работе [Berezina, Bayuk, 2022] и применен в настоящем исследовании. Модули упругости тела сравнения K^C и μ^C можно представить в виде линейной комбинации самой “мягкой” (с наименьшими модулями упругости) и “жесткой” (с наибольшими модулями) компонент в виде:

$$K^C = (1 - f)K_{max} + fK_{min} \quad (2)$$

$$\mu^C = (1 - f)\mu_{max} + f\mu_{min} \quad (3)$$

Таким образом определённый параметр f , принимающий значения от 0 до 1, косвенно отражает связность жесткой компоненты. Важно отметить, что в данном подходе предполагается, что “мягкая” компонента распределена в породе равномерно, в противном

случае, это приведет к неоднородности породы, и методы теории эффективных сред будут неприменимы.

В рамках данной модели трещины, образовавшиеся в результате созревания керогена, находятся на контакте керогена и минеральных включений. В терминах петроупругого моделирования можно сказать, что трещины находятся в породе и считаются отдельным включением. Случай нахождения трещин в самом керогене в данном исследовании не рассматривается.

В данной главе приводятся результаты анализа чувствительности построенной петроупругой модели к ее параметрам. В качестве параметров исследовались следующие характеристики: объемное содержание трещин (параметр трещинной пористости), объемная доля содержания керогена, пористость керогена и степень его связности, физические свойства флюида, заполняющего трещины, значение аспектного отношения для включений керогена и трещин, заполненных флюидом.

В качестве примера на рис. 4 показаны результаты такого исследования – влияние на скорости упругих волн степени связности керогена, которая характеризуется f -параметром, для различных значений объёмного содержания керогена в породе.

По результатам моделирования методом самосогласования, с учетом связности включений, можно сделать следующие основные выводы. Наиболее существенно на эффективные упругие свойства среды влияют такие факторы как объемное содержание трещин и керогена. Пористость керогена влияет не так сильно, однако, когда кероген становится матрицей, влияние этого фактора больше ощущается для продольных волн (V_p), чем для поперечных (V_s).

Созревание керогена - сложный физико-химический процесс, протекающий в ходе изменения давления и температуры. Учет изменения физических свойств генерируемой нефти был осуществлен с целью косвенно определить по свойствам флюида степень зрелости керогена. Как показали исследования автора, упругие свойства флюида меняются, но не значительно [Окуневич и др., 2025, принято в печать]. Этот параметр практически не отражался в изменении эффективных упругих свойств керогеносодержащей породы, полученных в по результатам петроупругого моделирования.

Базовые модели, описанные выше, применимы для изотропных пород. Однако одна из причин возникновения анизотропии упругих эффективных свойств – наличие упорядоченной трещинной пористости. Согласно геологическому описанию пород доманиковой формации, их можно отнести к тонкослоистым сланцеподобным горным породам, которые, как правило, представляют собой трансверсально изотропную среду с вертикальной осью симметрии (VTI). Для определения эффективных упругих свойств такой VTI среды в данной работе был использован метод Хадсона [Hudson, 1980, 1981], который основан на теории рассеяния упругого поля в изотропной упругой среде с тонкими эллипсоидальными трещинами.

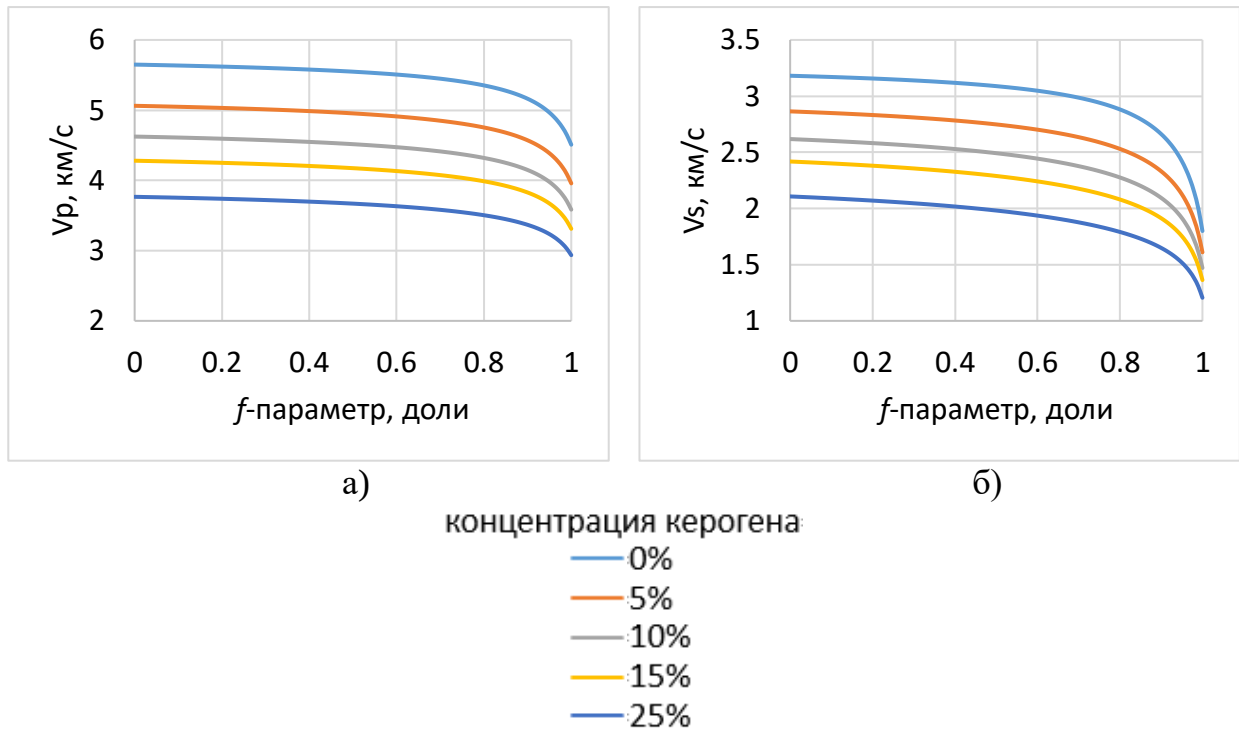


Рис. 4 Параметрические зависимости эффективных скоростей упругих волн от значения f -параметра, параметр – объемное содержание керогена в породе (а – V_p , б – V_s , “мягкая” компонента – кероген).

В данном исследовании предполагалось, что трещины заполнены жидким флюидом – нефтью, которая образовалась в результате созревания керогена. Для насыщения “сухих” трещин по Хадсону использовался метод Гассмана (анизотропный вариант) [Gassmann, 1951]. На рисунке 5 показаны индикатрисы эффективных скоростей упругих волн в анизотропной флюидонасыщенной керогеносодержащей породе, рассчитанные по результатам петроупругого моделирования методом Хадсона с последующим флюидозамещением по методу Гассмана. На каждом рисунке представлены три типа графиков для скоростей продольной волны и для двух поперечных волн. Для аспектного отношения 10^{-4} верхний предел параметра трещинной пористости – 0,018%, что соответствует значению плотности трещин 0,43, которая определяется по формуле $\varepsilon = 3\varphi/4\pi\alpha$, где φ – трещинная пористость (в долях единицы), α – значение аспектного отношения трещин. Метод Хадсона с насыщением по методу Гассмана показал значительную анизотропию эффективных скоростей упругих волн.

Совокупный результат второй и третьей главы – оценка влияния основных литологических особенностей состава и строения керогеносодержащих отложений доманикового типа, обосновывает следующее **защищаемое положение**: “Содержание керогена в породе, его пористость и степень связности являются определяющими факторами, влияющими на эффективные упругие свойства доманиковых отложений”.

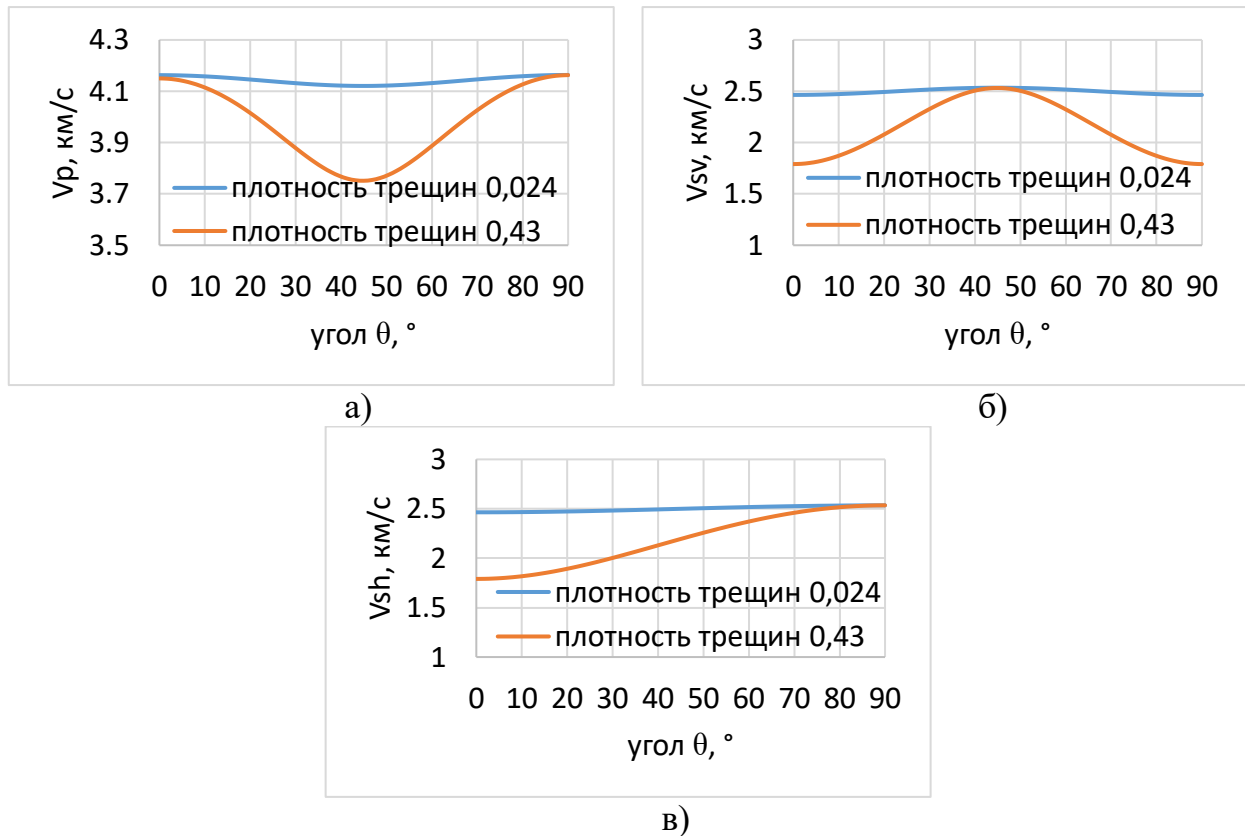


Рис. 5 Индикатрисы эффективных скоростей упругих волн в анизотропной флюидонасыщенной керогенсодержащей породе в зависимости от угла между направлением распространения упругой волны и осью симметрии, аспектное отношение трещин 10^{-4} (а – V_p , б – V_{sv} , в – V_{sh}). Угол отсчитывается от вертикальной оси.

Глава 4 посвящена построению разномасштабных петроупругих моделей пород доманиковой формации. Полученные данные моделируют природные свойства пород доманиковой формации. Моделирование на данном масштабе можно отнести к масштабу скважинных измерений. Для расчета использовались четыре модели, которые состояли из множества статистически однородно перемешанных прослоев жесткой изотропной карбонатной породы и прослоев керогеносодержащих пород. Каждая модель отличалась строением керогеносодержащих слоев. Далее, говоря о моделях, будем иметь в виду свойства пласта, богатого органическим веществом. Расчет эффективных упругих свойств проводился методом Бейкуса [Backus, 1962].

Первая модель – в качестве прослоя керогеносодержащей породы взят изотропный пористый кероген. Данная модель была выбрана как самая простая, которая иногда используется на практике, особенно, когда содержание керогена весьма незначительно.

Во второй модели предполагалось, что в прослоях керогеносодержащих пород кероген является включением наряду с другими минералами и хаотически ориентированными трещинами. В рамках этой модели было исследовано влияние основных литологических характеристик на эффективные упругие свойства. Установлено, что параметр трещинной пористости и содержание керогена вносят гораздо больший вклад в анизотропию скоростей упругих волн, чем параметр связности включений керогена f . Он начинает влиять на анизотропию только при очень значениях, близких к 1, т.е. когда

кероген по своей конфигурации близок к односвязной области (матрице). Однако, для параметра пористости керогена наблюдается иная закономерность. Заметное увеличение степени анизотропии обусловлено ростом параметра связности пор.

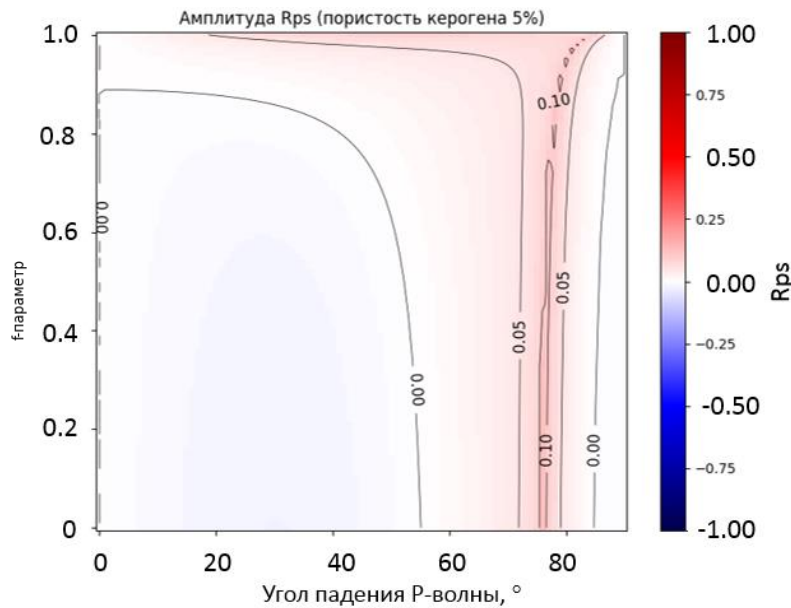
Третья модель учитывала собственную анизотропию керогеносодержащих прослоев, вызванную ориентированными трещинами. В силу ограниченной области физичности метода Хадсона параметр трещинной пористости для данной модели был очень мал – до 0,1 %. Но даже в этом случае наблюдается значимая анизотропия скоростей упругих волн.

В четвертой модели эффективный пласт, который моделировал доманиковую толщу, не являлся тонкослоистой средой, как в трех предыдущих моделях. Пласт представлял собой керогеносодержащую породу, в которую были помещены стяжения кальцита (крупные включения). Такое внутреннее строение породы иногда наблюдается для полноразмерного керна доманиковых отложений.

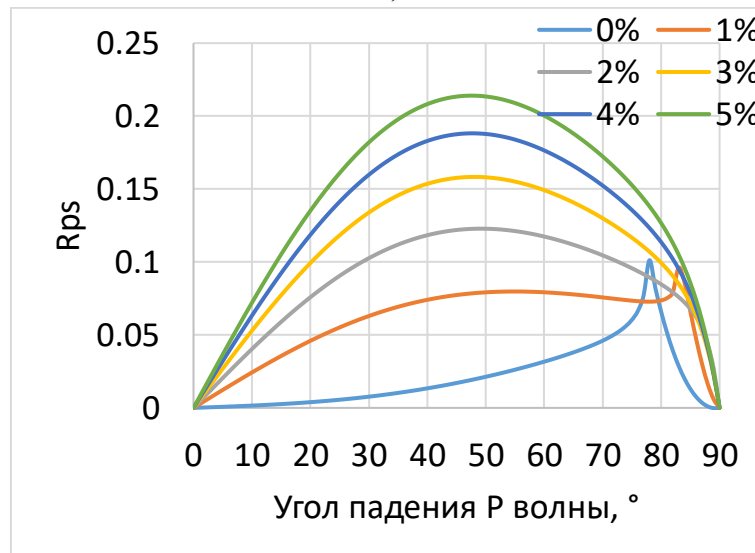
Глава 5 посвящена расчету коэффициентов отражения для анизотропной VTI среды для простой двухслойной модели. Эта глава завершает теоретическое разномасштабное моделирование упругих свойств керогеносодержащих отложений доманикового типа. Также, как и во второй главе, посвященной базовым петроупругим моделям, была использована та же сейсмогеологическая модель, но на данном этапе упругие свойства керогеносодержащего слоя получены по результатам главы 4. Рассчитывались коэффициенты отражения продольных и обменных волн по формулам Цёппритца. По результатам расчета строились карты коэффициентов отражения (рис. 6, а) и графики (рис. 6, б) при фиксированных значениях параметров, участвующих в построении карт, например, значение параметра связности f или значение отношения суммарной мощности керогеносодержащих прослоев к “жестким” породам.

По сравнению с результатами, полученными во второй главе, упругие свойства потенциально-перспективного пласта стали значительно “жестче”, за счет переслаивания с прослоями изотропной карбонатной породы. Такая модель пласта отложений доманикового типа более корректна и приближена к реальному разрезу.

За счет меньшего контраста упругих свойств между двумя слоями, задача выделения зон с повышенными (по модулю) значениями коэффициентов отражения (продольных и обменных упругих волн), связанными с особенностями состава и строения керогеносодержащих пород доманикового типа, представляет большой научный и производственный интерес.



а)



б)

Рис. 6 Карты коэффициентов отражения (а) и графики значений коэффициентов отражения при $f=1$ обменной волны от керогеносодержащего слоя симметрии VTI.

Изменение значений коэффициентов отражения исследовалось в зависимости от тех же параметров состава и строения исследуемых пород, что и в третьей и четвертой главах. Для лучшей визуализации и анализа результатов также были построены изолинии значений коэффициентов отражения на картах. Особый интерес представляли карты, которые показывали зависимость значений коэффициентов отражения от параметра связности включений керогена f (модель изотропного керогеносодержащего пласта с неориентированной трещинной пористостью в главе 4). В результате анализа карт можно заключить, что изменение параметров состава и строения исследуемых пород четче всего проявляется на картах обменных волн. Также стоит отметить, что проявление зон повышенных значений коэффициента отражения обменной волны связано со значениями параметра f очень близких к 1 на интервале углов падения упругой волны от 30 до 65 градусов. На больших углах наблюдается зона критического угла или образование головной волны.

На основании этих результатов сделаны выводы о влиянии особенностей строения и состава доманиковых отложений, рассмотренных ранее на этапах петроупругого моделирования. Эти особенности четко проявляются на масштабе сейсмических исследований. Изменение исследуемых параметров ярче всего проявляется на обменных волнах. Результаты главы 5 обосновывают важность учета особенностей состава и строения исследуемых пород, а как следствие и предложенных петроупругих моделей, так как изменение этих особенностей прямо влияет на упругое поле в масштабе наземных сейсмических исследований.

Глава 6 посвящена разномасштабному моделированию упругих свойств доманиковых отложений на примере реальных данных. В качестве исходного материала использовались данные, полученные для скважины, пробуренной в Волго-Уральском нефтегазоносном бассейне. Основной задачей исследования в этой главе является выделение петротипов доманиковых отложений на основе данных о физических свойствах пород, полученных в результате скважинных исследований, и сопоставление полученных петротипов с известными литотипами исследуемых пород. Помимо этого, для каждого петротипа определялся фактор, оказывающий доминирующее влияние на его упругие свойства.

За основу была взята классификация из диссертации Гафуровой [Гафурова, 2018], которая выделяет 12 литотипов. Основными признаками является минеральный состав, а именно, литотип выделяется по преобладанию карбонатной компоненты, кремнистой или смешанной, где доли карбонатной кремнистой и глинистой компонент примерно равнозначны (арабская цифра в названии). Литотипы делятся в зависимости от содержания органического вещества (римская цифра в названии таблицы 1). Кроме того, литотипы делятся по текстурному признаку – слоистость (А- неслоистый; В - слоистый) (таблица 1).

Несмотря на то, что за основу была взята классификация Гафуровой, границы для компонент были несколько расширены. Это связано, прежде всего, с тем, что в работе Гафуровой даются количественные оценки минеральных компонент для коллекции образцов, в то время как материалом для настоящего исследования является только информация ГИС из одной скважины.

При практическом использовании предложенной классификации, возникает вопрос, как разделить слоистые и неслоистые литотипы ПА1 и ПВ1, а также ПА3 и ПВ3.

Таблица 1 Литологические типы, используемые для классификации данных ГИС.

ЛТ\сод-е, %	Карб.	Крем.	Глин.	Органическое вещество
IA1	≥ 50	< 50	< 50	$\leq 0,5$
IA3	< 50	< 50	< 50	$\leq 0,5$
ПА1, ПВ1	≥ 50	< 50	< 50	От 0,5 до 5
ПВ2	< 50	≥ 50	< 50	От 0,5 до 5
ПА3, ПВ3	< 50	< 50	< 50	От 0,5 до 5
ПВ1	≥ 50	< 50	< 50	От 5 до 25
ПВ2	< 50	≥ 50	< 50	От 5 до 25
ПВ3	< 50	< 50	< 50	От 5 до 25
IVB3	< 50	< 50	< 50	> 25

Слоистость может вызывать анизотропию упругих свойств, и, как следствие, анизотропию скоростей упругих волн. Разделение на слоистые и неслоистые литотипы для глубин скважины, имеющих одинаковый минеральный состав, необходимо проводить по скоростям поперечных упругих волн, так как для поперечных волн слоистость будет занижать скорости в направлении, перпендикулярном слоистости. Для продольных волн это утверждение не всегда верно. Данные выводы получены в настоящей работе на основе анализа точного решения Бейкуса для эффективного тензора упругости тонкослоистой среды.

Скважинные данные, разделенные на литотипы (рис. 7а), объединились в пять петротипов (пять групп с отличающимися упругими свойствами). Эти литотипы различаются, прежде всего, по содержанию органического вещества: высокоуглеродистый петротип (литотипы ПВ3, ПВ2, ПВ1); кремнистый петротип с повышенным содержанием ОВ (литотипы ПВ3, ПВ2); карбонатный петротип с повышенным содержанием ОВ (литотипы ПВ1); петротип смешанного состава с повышенным содержанием ОВ (литотипы ПА3); карбонатный петротип с низким содержанием ОВ (литотипы ПА1, ІА1, ІА3) (рис. 7б). Объединение литотипов в петротипы подробнее представлено в таблице 2.

Проводить петроупругое моделирование на исследуемом интервале скважины корректнее, именно, для петротипов, так как предложенные петроупругие модели зависят от параметров, влияющих на упругие свойства. Получившиеся пять петротипов можно разделить на две группы: изотропные (неслоистые) и анизотропные (слоистые).

Для расчёта эффективных упругих свойств изотропной модели использовался метод самосогласования Берримана [Berryman, 1995]. Модель состояла из набора минеральных компонент и керогена сферической формы, а также двух типов пустотного пространства: изометричных и неизометричных пор, заполненных нефтью.

Анизотропная (слоистая) модель была комбинированной. В результате анализа литературных данных и фотографий керна с других месторождений, подобных этому, можно аппроксимировать слоистую модель набором статистически однородно перемешанных прослоев “жестких” карбонатных или кремнистых пород и керогеносодержащих. Модель керогеносодержащих прослоев использовалась как в случае с изотропными (неслоистыми) петротипами. Таким образом, вторая модель для анизотропных петротипов была иерархической. Первый уровень иерархии – модель изотропной керогеносодержащей породы, второй уровень – смесь прослоев “жестких” пород и “мягких” керогеносодержащих. Для второй петроупругой модели неизвестными параметрами были форма порового пространства и объемная концентрация прослоев “жестких” пород.

В результате применения петроупругого моделирования к данным ГИС получено распределение вдоль ствола скважины следующих величин: всех компонент матрицы упругости симметрии VTI , параметров Томсена (ϵ , γ , δ), характеризующих анизотропию упругих свойств, и параметров микроструктуры (изометричной пористости, трещинной пористости и аспектного отношения трещин). Для этих величин для каждого петротипа

также построены параметрические диаграммы рассеяния (кроссплоты) « V_p/V_s - акустический импеданс Z_p » (рис. 8).

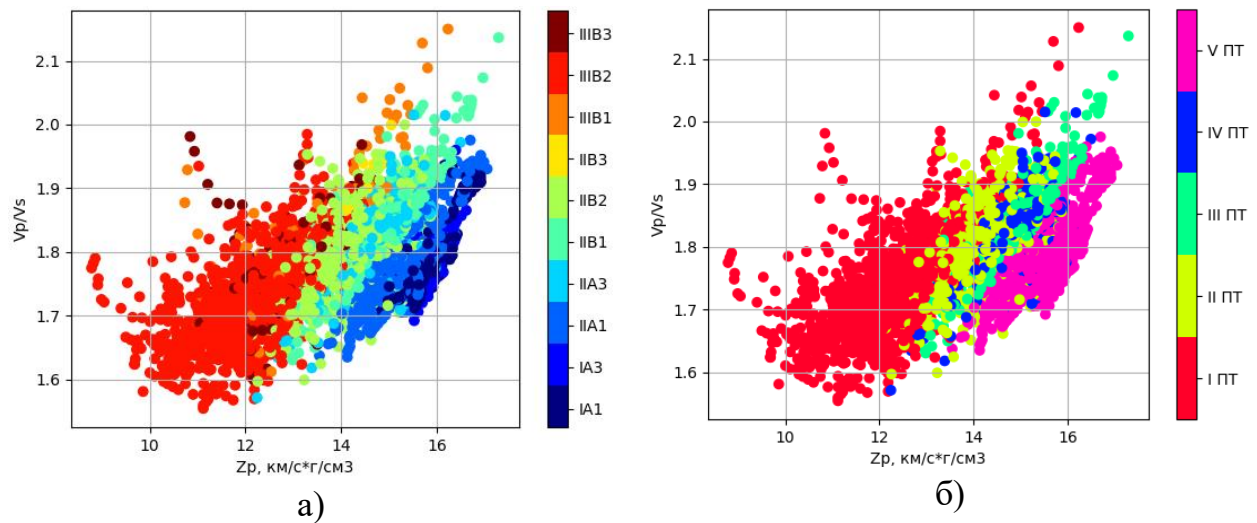


Рис. 7 Кроссплоты упругих свойств скважины с разбиением по: а – литотипам; б – петротипам. Z_p – акустический импеданс ($Z_p = V_p \cdot \rho$, где V_p – продольная упругая скорость, ρ – плотность).

На рисунке 8 на диаграммах рассеяния цветом показан один из параметров микроструктуры, полученный по результатам петроупругого моделирования: десятичный логарифм изометричной и трещинной пористости, форма трещин. По результатам анализа кроссплотов некоторые петротипы разделялись на подгруппы в зависимости от степени влияния микроструктурных параметров на упругие свойства. Важно отметить, что факторы, оказывающие наиболее значимое влияние на упругие свойства, могут быть разными для разных петротипов.

Завершающим этапом исследования этой главы был переход от масштаба ГИС к масштабам наземных сейсмических исследований. С помощью метода Бейкуса были рассчитаны упругие свойства в скользящем окне вдоль ствола скважины. Была выбрана частота (80 Гц), соответствующая наибольшей частоте спектра данных сейсмических исследований, которые относятся к участку исследований (скважина так же находится на этом участке) (рис. 9).

Таблица 2: Связь литологических типов и петрофизических, используемых для классификации данных ГИС.

ЛТ:	Описание:	ПТ:	Описание	ПТ разделяется по:
IA1	Карбонатный неслоистый (изотропный) низкоуглеродистый	V	Глинисто-кремнисто-карбонатный неслоистый (изотропный) низкоуглеродистый	Объемной концентрации трещин
IA3	Смешанного состава неслоистый (изотропный) низкоуглеродистый			
IIA1	Карбонатный неслоистый (изотропный) углеродистый			
IIA3	Смешанного состава неслоистый (изотропный) углеродистый	IV	Смешанного состава неслоистый (изотропный) углеродистый	Объемной концентрации трещин
IIВ1	Карбонатный слоистый (анизотропный) углеродистый	III	Карбонатный слоистый (анизотропный) углеродистый	Объемной концентрации трещин и изометричных пор
IIВ2	Кремнистый слоистый (анизотропный) углеродистый	II	Глинисто-кремнистый слоистый (анизотропный) углеродистый	Объемной концентрации изометричных пор
IIВ3	Смешанного состава слоистый (анизотропный) углеродистый			
IIIB1	Карбонатный слоистый (анизотропный) высокоуглеродистый	I	Высокоуглеродистый слоистый (анизотропный)	Объемной концентрации трещин
IIIB2	Кремнистый слоистый (анизотропный) высокоуглеродистый			
IIIB3	Смешанного состава слоистый (анизотропный) высокоуглеродистый			

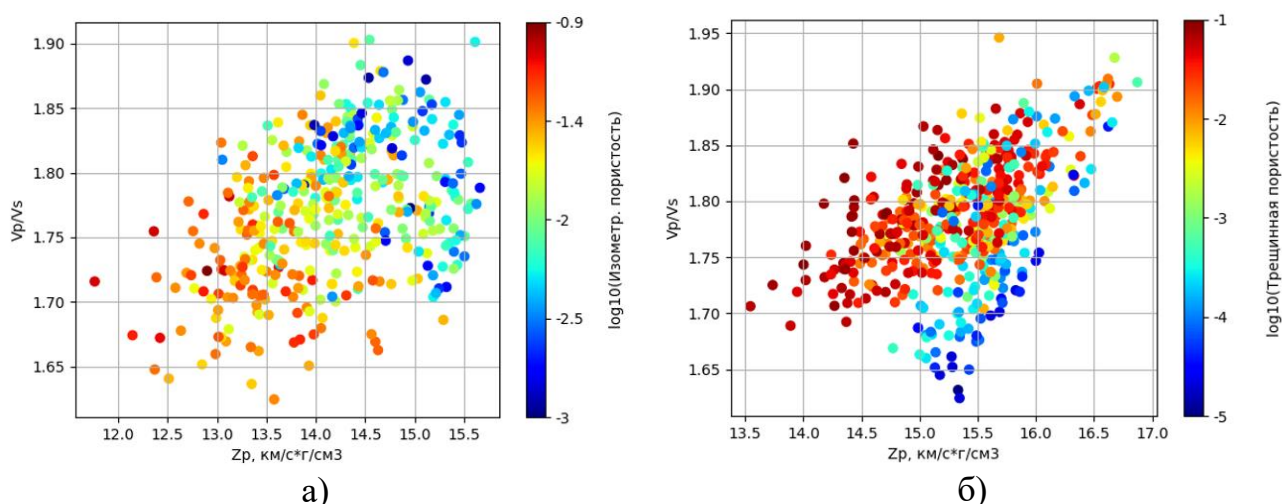


Рис. 8 Кроссплоты упругих свойств разных петротипов (а – IV; б – I) с разными доминирующими факторами, влияющими на их упругие свойства (а – десятичный логарифм изометричной пористости; б – десятичный логарифм трещинной пористости).

В этой главе предложена стратегия прогноза упругих свойств доманиковых отложений на различных масштабах геофизических исследований, основанная на анализе:

литологических особенностей состава и строения исследуемых пород, данных ГИС. Основным инструментом прогноза являлось петроупругое моделирование методами теории эффективных сред. Благодаря данному подходу, можно прогнозировать потенциально-перспективные интервалы нефтегазоности, отличающиеся параметрами микроструктуры, например, трещинной пористостью. Переход от литотипов к петротипам – важный методологический результат, который может быть использован при количественной и качественной интерпретации сейсмических данных. Отдельным важным выводом можно считать успешное применение анизотропных моделей для слоистых сред. Анализируя результаты волнового моделирования для AVO (AVA) анализа, можно сделать вывод, что неучет влияния анизотропии может приводить к значительным искажениям амплитуд сейсмического сигнала, особенно, на дальних углах отражения: от 20 до 40 градусов.

Совокупный результат пятой и шестой глав – расчет коэффициентов отражения для границы изотропного полупространства и модели анизотропной керогеносодержащей среды, свойства которой получены по результатам петроупругого моделирования; применение разработанных петроупругих моделей к реальным скважинным данным обосновывает следующее **защищаемое положение**: *“Разработанные иерархические петроупругие модели пород доманиковой формации позволяют определять по данным геофизических исследований скважин и AVO-анализа данных сейсморазведки такие параметры, как: содержание керогена в породе, его пористость и степень связности.”*

Результат четвертой главы – построение модели слоистых сред на масштабе ГИС и оценка анизотропии, вызванной прослаиванием “жестких” пород и “мягких” керогеносодержащих, а также направленной трещинной пористости, вместе с результатами пятой и шестой глав обосновывают последнее **защищаемое положение**: *“Ориентированные трещины в керогене, линзы минералов и переслаивание керогеносодержащих слоев с карбонатными породами порождают анизотропию упругих свойств доманиковых пород, определяемую методами геофизических исследований скважин и сейсмическими исследованиями.”*

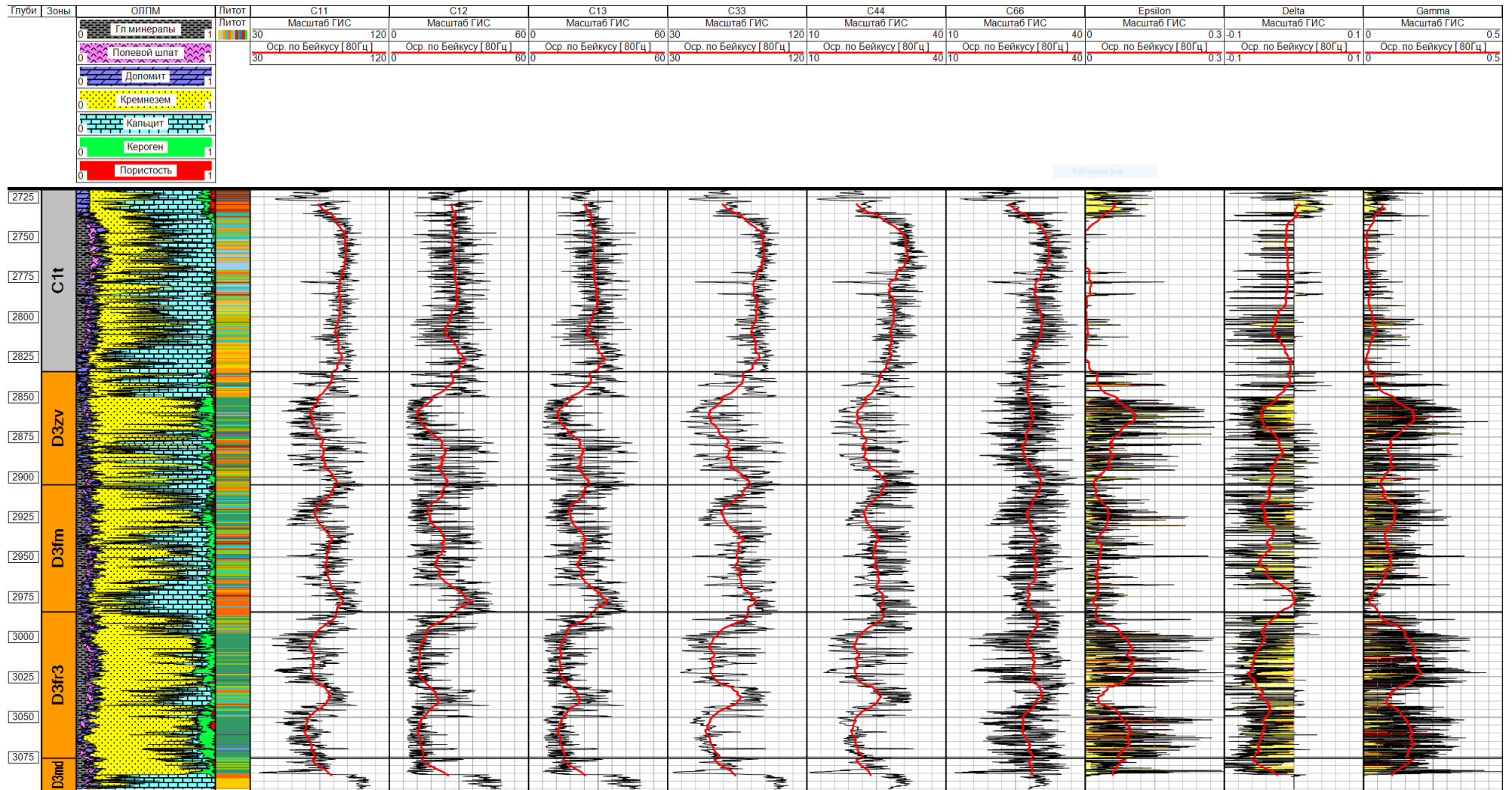


Рис. 9 Результаты разномасштабного моделирования упругих свойств и оценка анизотропии (значения параметров Томсена) на частоте 80 Гц для исследуемого интервала скважины.

Заключение

Основной задачей исследования является создание разномасштабных петроупругих моделей отложений доманиковой формации с целью выявления основных факторов, влияющих на их модули упругости и скорости упругих волн. Основной особенностью данных пород является то, что они низкопористые и малопроницаемые, причем, углеводороды созревают в керогене, формируя в нем пустотное пространство и, как следствие, избыточное поровое давление, которое может влиять на свойства порозаполняющего флюида. Эти факторы обуславливают отличия петроупругого моделирования таких пород от традиционных коллекторов углеводородов.

Проведено разномасштабное исследование низкопористых и малопроницаемых горных пород, которые представляют наибольший научно-исследовательский интерес в области разведочной геофизики и геологии горючих полезных ископаемых. При разномасштабном исследовании был проведен анализ чувствительности моделей к большинству важных физических и микроструктурных параметров. Созданы наборы петроупругих моделей для керогеносодержащих пород с различными физическими и геологическими свойствами. Все этапы моделирования, интерпретации и визуализации полученных результатов были осуществлены полностью или частично в программах собственного авторства, написанные на языке программирования Python.

Основные результаты работы состоят в следующем:

1. Доманиковые отложения состоят из множества компонент с широким спектром упругих свойств. Кероген, входящий в состав этих пород, имеет контрастные свойства по отношению к другим компонентам. Вследствие этого содержание керогена, его пористость и вид распределения в объеме породы (в виде матрицы, включений, слоев) оказывают значительное влияние на эффективные упругие свойства. Данное утверждение обосновывается результатами петроупругого моделирования с использованием различных методов теории эффективных сред.
2. Результаты петроупругого моделирования показали, что степень связности керогена значительно влияет на эффективные упругие свойства доманиковых отложений. В некоторых случаях влияние этого фактора проявляется сильнее по сравнению с пористостью керогена. (параметр связности включений $f > 0,7$).
3. Моделирование доманиковых отложений как анизотропной трещиноватой среды показало, что трещинная пористость является основным фактором, влияющим на упругие эффективные свойства. Исследование параметра формы включений показало, что аспектное отношение трещин является решающим фактором для выбора достоверной модели породы. Наличие трещинной пористости на уровне 0,02% вызывает значительную анизотропию упругих свойств.
4. Результаты моделирования эффективных упругих свойств пласта, состоящего из тонких слоев, показало, что из-за сложной внутренней структуры слоев, содержащих контрастные включения, анизотропия скоростей упругих может наблюдаться даже в масштабе сейсмических работ. Показано, что параметр

связности керогена оказывает сильное влияние на анизотропию эффективных упругих скоростей.

5. При увеличении масштаба исследований уменьшается влияние на эффективные упругие свойства таких факторов как: пористость керогена, модуль сжатия нефти, степень связности керогеновых включений (если кероген не является матрицей).
6. На основе построенных петроупругих моделей решена обратная задача по определению микроструктурных параметров пород по данным геофизических исследований для скважины, пробуренной в Волго-Уральском нефтегазоносном бассейне. Получено распределение параметров Томсена, соотношения между изометричной и неизометричной пористостью и формы неизометричных пор вдоль ствола скважины, распределение линз “жестких” минералов в слоистых петротипах. Показано, что для выделенных литотипов пород доманиковых отложений выделяются петротипы, характеризующиеся разной трещинной пористостью, формой пустот и толщиной минеральных прослоев.
7. Результаты данной работы позволили создать обширный набор петроупругих моделей пород доманиковой формации, который может в дальнейшем послужить представительной базой для обучения моделей искусственного интеллекта. В частности, с использованием построенных петроупругих моделей возможно построение синтетических волновых форм, апробация численных алгоритмов поиска доманиковых отложений на реальных данных с помощью имеющихся синтетических данных.

Таким образом, в работе решена задача об установлении взаимосвязей между параметрами внутреннего строения и состава пород доманиковых отложений и упругими характеристиками этих пород (как изотропными, так и анизотропными) в разных масштабах – керн, ГИС, межскважинная томография, сейсмические исследования. Решение этой задачи имеет важное научное значение, поскольку позволяет повысить достоверность интерпретации разномасштабных экспериментальных данных, полученных для таких месторождений, и прогнозировать эти характеристики в зависимости от возможных изменений параметров в процессе поисков и разработки месторождений.

Список публикаций по теме диссертации

Статьи из списка ВАК:

• **Окуневич В.С.** Петрофизическое моделирование пород доманиковой формации как основа интерпретации сейсмических данных / В.С. Окуневич, И.О. Баяук // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. — 2022. — №44. — С.—149–156.

• **Окуневич В.С.** Анализ синтетических AVO-сейсмограмм по результатам петроупругого моделирования пород доманиковой формации / В.С. Окуневич, И.О. Баяук // Геофизика. — 2023. — №4. — С. 8–15.

• **Okunevich V.S.** Effect of porosity and kerogen distribution on elastic properties of Bazhenov formation shale rocks – rock physics modeling / A.I. Tyapkina, I.A. Berezina, G. A. Kalmykov, V.S. Okunevich, I.O. Bayuk // Сейсмические приборы. — 2025. — №1. — С. 14–35.

Материалы и тезисы докладов на конференциях:

- **Окуневич В.С.** Разномасштабное моделирование пород доманиковой формации / В.С. Окуневич, В.А. Зацепин, И.О. Баюк, Д.А. Данько // Наука о сланцах 25. Новые данные, г. Москва, Russia, 7-8 апреля 2025.
- **Окуневич В.С.** Разномасштабное моделирование пород доманиковой формации методом осреднения Бейкуса / В.С. Окуневич, И.О. Баюк// Петромодел ь / BalticPetroModel 2024. 8-я научно-практическая конференция, г. Петергоф, Russia, 4-6 сентября 2024.
- **Окуневич В.С.** Влияние развития трещин в керогене в процессе его созревания на физические свойства флюида пород доманиковой формации / В.С. Окуневич, И.О. Баюк// 66-я Всероссийская научная конференция МФТИ, секция Прикладная геофизика, 1-6 апреля 2024.
- **Окуневич В.С.** Развитие трещин в процессе созревания керогена на примере пород доманиковой формации / В.С. Окуневич, И.О. Баюк // VII Международная геолого-геофизическая конференция и выставка «ГеоЕвразия-2024. Геологоразведочные технологии - наука и бизнес», Москва, Краснопресненская набережная, 12, Центр международной торговли, Russia, 12-14 марта 2024.
- **Окуневич В.С.** Анализ синтетических AVO-сейсмограмм по результатам петроупругого моделирования пород доманиковой формации / В.С. Окуневич, И.О. Баюк// Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН, 8-9 ноября 2023.
- **Окуневич В.С.** Теоретическое моделирование синтетических AVO-сейсмограмм с использованием результатов петроупругого моделирования пород доманиковой формации / В.С. Окуневич, И.О. Баюк //Петромодел ь / BalticPetroModel 2023. 7-я научно-практическая конференция, г. Петергоф, Russia, 18-21 сентября 2023.
- **Окуневич В.С.** Создание сейсмогеологической модели на примере пород доманиковой формации с помощью методов теории эффективных сред / В.С. Окуневич, И.О. Баюк // Наука о сланцах 23. Новый опыт, г. Москва, Russia, 20-22 марта 2023.
- **Окуневич В.С.** Петроупругое моделирование пористого керогена / В.С. Окуневич // Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН, 9-11 ноября 2022.

Подписано в печать 8 августа 2025 г.

Формат 64×84/16. Объем 1,5 усл. печ. л.

Тираж 120 шт. Заказ №__

Отпечатано в ИАЦ ИФЗ РАН

123242, г. Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1

Тел./факс: (499) 254 90 88