

ОТЗЫВ
официального оппонента
на диссертацию Окуневи́ча Всеволода Станиславовича

“МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ УПРУГИХ СВОЙСТВ
ПОРОД ДОМАНИКОВОЙ ФОРМАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРИИ
ЭФФЕКТИВНЫХ СРЕД”,

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 1.6.9 – “Геофизика”

Диссертационная работа В.С. Окуневи́ча “Математическое моделирование эффективных упругих свойств пород доманиковой формации с использованием теории эффективных сред” содержит 163 страницы, включая текст, 91 рисунок, 12 таблиц, список литературы из 99 библиографических источников и 2 приложений.

Оглавление диссертационной работы включает введение, 6 глав, заключение, список сокращений и условных обозначений, список литературы и список приложений.

Введение в диссертационную работу полностью соответствует предъявляемым к ней требованиям. Она логически выстроена, содержательна и качественно оформлена. Ключевые элементы введения — актуальность, цель, задачи, научная новизна и практическая значимость — представлены четко и комплексно, что создает полноценную основу для последующего исследования.

Актуальность темы не вызывает сомнений и обусловлена исчерпанием потенциала традиционных месторождений. В связи с этим основное внимание в мировой практике смещается в сторону нетрадиционных коллекторов, в частности, характеризующихся низкими фильтрационно-емкостными свойствами.

В качестве объекта исследования автором обоснованно выбраны доманиковые отложения Волго-Уральской нефтегазоносной провинции (НГП), представляющие значительный интерес как богатые органическим веществом породы-коллекторы. Подчеркивается необходимость детального изучения их геологического строения для решения практических задач по поиску и разработке таких месторождений.

Историческая и научная база темы является солидной. Доманиковая формация, известная с XIX века, всесторонне изучена в трудах ведущих советских и российских ученых (Страхов, Максимова, Алиев и др.). При этом автором справедливо отмечается, что ключевой объект современных исследований — кероген, влияние которого на петрофизические свойства активно изучается зарубежными авторами (Yan, Dvorkin и др.).

Основной пробел в научных исследованиях, на который направлена работа, идентифицирован верно. Отсутствуют специализированные разномасштабные петроупругие модели, учитывающие специфику состава и микроструктуры доманиковых пород (зрелость керогена, его пористость). Подчеркивается, что применяемые на практике модели (Шу-Пейна, Шу-Уайта, «матрица-включение») применимы к породам совсем другого типа (карбонатным и терригенным традиционным коллекторам) и неадекватно описывают сложное строение данных отложений, что обосновывает необходимость проведения настоящего исследования.

Цель работы является актуальной и четко сформулированной. Она заключается в установлении взаимосвязей между упругими свойствами и микроструктурными параметрами доманиковых пород для повышения достоверности интерпретации геофизических данных.

Поставленные задачи (4 пункта) логически вытекают из цели и полностью раскрывают путь её достижения:

Комплекс задач представляется последовательным и методически обоснованным, охватывающим все ключевые аспекты исследования — от базового моделирования до практического применения.

Научная новизна исследования заключается в комплексном решении проблемы разномасштабного петроупругого моделирования пород доманиковой формации. Впервые созданы специализированные петроупругие модели, учитывающие ключевые микроструктурные параметры: содержание керогена, его пористость, трещиноватость и степень связности в породе.

Все элементы научной новизны имеют практическую направленность и позволяют решить актуальные задачи поиска и разведки нетрадиционных коллекторов.

Методология и методы исследования выстроены в виде последовательной трехэтапной схемы. На первом этапе проведен комплексный анализ экспериментальных данных, включавший изучение микроструктуры пород по фотографиям шлифов и ультразвуковые измерения на коллекции образцов.

На втором этапе, с применением методов теории эффективных сред, построены базовые петроупругие модели в масштабе зерна, которые верифицированы автором на данных о скоростях упругих волн, полученных в лаборатории для представительных образцов доманиковых пород. Третий этап посвящен разномасштабному моделированию упругих свойств керогеносодержащих отложений, также с использованием теоретико-модельного подхода.

Особого внимания заслуживает инструментальная реализация исследования: все расчеты и визуализация результатов выполнены с помощью оригинальных программных комплексов, разработанных автором на языке Python 3.0, с дополнительным использованием Microsoft Excel для обработки данных.

Защищаемые положения, выносимые на защиту, отражают суть полученных результатов и сомнений не вызывают

Апробация работы и публикации по теме диссертационного исследования производят хорошее впечатление. Большое количество выступлений на ведущих отраслевых конференциях, большое количество публикаций, в том числе, три статьи в журналах из списка ВАК свидетельствуют о довольно широкой апробации результатов диссертационного исследования в научном и профессиональном сообществе.

Содержание работы

Структура и содержание **первой главы** демонстрируют системный подход к анализу предметной области. Глава начинается с детального литературного обзора, логически разделенного на четыре тематических блока.

Первый раздел содержит комплексную характеристику объекта исследования - литологических особенностей состава и строения доманиковой формации. Во втором разделе последовательно излагаются теоретические основы петроупругого моделирования, его ключевые понятия и методические особенности. Третий раздел раскрывает интеграционную роль петроупругого моделирования в системе разномасштабных исследований, уделяя особое место методам масштабного перехода между различными уровнями геофизических исследований. Завершающий раздел представляет сравнительный анализ научной новизны предложенных автором подходов к моделированию керогеносодержащих пород в контексте современных исследований. Такая структура главы обеспечивает необходимый теоретический фундамент для последующего изложения собственных разработок автора.

Во **второй главе** представлена разработка базовых петроупругих моделей для керогеносодержащих пород доманикового типа. Моделирование основано на комплексных

данных ультразвуковых, литолого-петрографических и геохимических исследований керна. Особое внимание уделено моделированию керогена, чьи упругие свойства (модули сжатия и сдвига) существенно варьируются в зависимости от состава и пористости. При этом кероген рассматривался как в виде изолированных включений, так и в качестве породообразующей матрицы.

На основе методов теории эффективных сред, в частности, метода самосогласования Берримана, разработана иерархическая петроупругая модель, показавшая приемлемую сходимость с экспериментальными данными (расхождение менее 3%). Построенная сейсмогеологическая модель пласта демонстрирует прогнозируемое изменение упругих свойств в зависимости от концентрации и пористости керогена. Важным результатом моделирования представляется то, что эти изменения проявляются даже в масштабе наземной сейсмики, что подтверждает значимость керогена для формирования упругого отклика пород и открывает новые возможности для поиска углеводородов.

В третьей главе развивается методика петроупругого моделирования керогеносодержащих пород с учетом трещинной пористости, заполненной нефтью. Ключевым аспектом является моделирование степени зрелости керогена через введение в породу флюидонасыщенных трещин, что соответствует поздним стадиям катагенеза.

Анализ результатов показал ограниченную применимость границ Хашина-Штрикмана и подтвердил преимущество методов, учитывающих геометрию и связность включений. Установлено, что определяющее влияние на эффективные упругие свойства оказывают объемное содержание трещин и керогена, тогда как пористость керогена и свойства флюида имеют второстепенное значение.

Моделирование на основе метода Хадсона выявило значительную анизотропию скоростей упругих волн, обусловленную упорядоченной трещиноватостью. Полученные результаты подтверждают, что содержание керогена, его пористость и степень связности являются определяющими факторами упругих свойств доманиковых отложений.

Результаты глав 2 и 3 убедительно доказывают первое защищаемое положение, устанавливающее количественные зависимости между микроструктурными параметрами керогена и упругими свойствами пород-коллекторов.

В четвертой главе решена задача построения разномасштабных петроупругих моделей, аппроксимирующих свойства пород доманиковой формации в масштабе скважинных исследований. Моделирование выполнено на основе четырех концептуальных схем, представляющих тонкослоистую среду как совокупность жестких карбонатных прослоев и керогеносодержащих слоев с варибельным внутренним строением. Расчет эффективных упругих свойств осуществлялся методом Бейкуса.

Проведенное исследование выявило существенное влияние микроструктурных особенностей на формирование макроскопических упругих откликов:

Базовая модель (пористый изотропный кероген) показала ограниченную применимость. Модель с включениями керогена и хаотичными трещинами подтвердила доминирующую роль трещинной пористости и содержания керогена в формировании анизотропии. Модель с ориентированными трещинами продемонстрировала, что даже низкая трещинная пористость ($\leq 0.1\%$) вызывает значительную анизотропию при наличии упорядоченной структуры.

Модель с крупными стяжениями кальцита, отклоняющаяся от парадигмы тонкослоистости, показала адекватность для описания полноразмерного керна.

Полученные результаты устанавливают количественные связи между микроструктурными параметрами керогена и макроскопическими упругими свойствами,

формируя основу для достоверной интерпретации геофизических данных на разных масштабах.

Глава 5 завершает цикл теоретического моделирования, посвященный расчету коэффициентов отражения для анизотропной VTI-среды в рамках двухслойной модели. В основе исследований лежит усовершенствованная сейсмогеологическая модель, в которой упругие свойства керогеносодержащего слоя уточнены на основании результатов предыдущей главы. Расчет коэффициентов отражения продольных и обменных волн выполняется по формулам Цёппритца с последующим анализом их зависимости от ключевых параметров - степени связности керогена и соотношения мощностей пластов.

Проведенное исследование выявило существенное увеличение жесткости потенциально-перспективного пласта, благодаря его переслаиванию с карбонатными породами, что значительно повышает геологическую достоверность модели. Установлено, что изменение литологических параметров наиболее четко фиксируется для обменных волн, где зоны повышенных значений коэффициента отражения проявляются при значениях параметра связности, близких к единице, в диапазоне углов падения от 30 до 65 градусов. Полученные результаты убедительно доказывают прямую зависимость между вариациями состава пород и их сейсмическим откликом, что подтверждает практическую значимость разработанных петроупругих моделей для интерпретации данных сейсморазведки.

В **шестой главе** представлено применение разработанной методики разномасштабного моделирования к реальным данным скважины в Волго-Уральском нефтегазоносном бассейне. Ключевой задачей являлось выделение петротипов доманиковых отложений на основе данных ГИС с последующим их сопоставлением с литотипами. В результате анализа установлено, что выделенные литотипы объединяются в петротипы, дифференцирующиеся преимущественно по содержанию органического вещества: высокоуглеродистый, кремнистый с повышенным ОВ, карбонатный с повышенным ОВ, смешанного состава с повышенным ОВ и карбонатный с низким ОВ.

Для обеспечения корректного петроупругого моделирования все петротипы были классифицированы на изотропные (неслоистые) и анизотропные (слоистые). При этом для изотропных моделей использовался метод самосогласования Берримана, учитывающий минеральные компоненты, кероген и два типа пор, тогда как анизотропная модель строилась по иерархическому принципу: первый уровень представлял изотропную керогеносодержащую породу, второй - переслаивание "жестких" и "мягких" прослоев.

Реализованный подход позволил получить распределения компонент матрицы упругости VTI-среды, параметров Томсена и характеристик микроструктуры вдоль ствола скважины. Анализ кросс-плотов " V_p/V_s - акустический импеданс" выявил различное влияние микроструктурных параметров на упругие свойства для разных петротипов. На завершающем этапе осуществлен переход к масштабу сейсмических исследований с расчетом упругих свойств в скользящем окне на частоте 80 Гц.

Разработанная стратегия обеспечивает прогнозирование упругих свойств на различных масштабах и выделение перспективных интервалов по параметрам микроструктуры. Методологически важным результатом является переход от литотипов к петротипам, что имеет критическое значение для количественной интерпретации сейсмических данных. Полученные результаты подтверждают, что неучет анизотропии может приводить к значительным искажениям сейсмических амплитуд, особенно на дальних углах. Совокупность результатов обосновывает возможность определения по данным ГИС и сейсморазведки содержания керогена, его пористости и степени связности,

а также демонстрирует влияние ориентированных трещин, линз минералов и переслаивания на анизотропию упругих свойств. На основе результатов глав 4, 5 и 6 автор формулирует оставшиеся защищаемые положения работы.

В **Заключении** представлены основные результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы

Диссертационная работа является завершенным исследованием и решением актуальной научной и производственной задачи.

Автореферат соответствует диссертационной работе.

Основные замечания по диссертационной работе

1. В главе “Введение” в полном тексте диссертации в параграфе “Объем и структура работы” (стр. 9) указано, что работа состоит из семи глав (в автореферате написано все верно – шесть глав). Также в оглавлении полного текста диссертации присутствуют только 6 глав. Вероятно, это лишь редакторская недоработка.
2. К замечаниям можно отнести, достаточно, скудный обзор геологической информации об объекте исследований (главе 1 “Литературный обзор”, параграфе 1.1 “Геологический объект исследования”). В главе по большей части приводится лишь минерально-компонентный состав изучаемых пород, но практически полностью отсутствует информация об обстановках осадконакопления, генезисе, тектонической обстановки присущей изучаемой формации. Так как данная исследовательская работа написана с упором на практическую значимость, т.е. автор мыслит себя прежде всего, как геолог-геофизик, а не как, исключительно, специалист по математическому моделированию.
3. В главе 1, в параграфе 1.1 не хватает таблиц со сравнением количественных характеристик типов керогена, например, водородного индекса (HI) и примера диаграммы Ван Кревелена. Несмотря на то, что тематика работы математическое моделирование, нельзя не отметить междисциплинарный характер настоящего исследования и именно поэтому замечания 2 и 3 актуальны.
4. К незначительному замечанию можно отнести тот факт, что автор слабо комментирует различие между доманиковой формацией Волго-Уральского и Тимано-Печорского НГБ. Хотя и в тексте последовательно отмечается, что настоящая работа посвящена математическому моделированию пород, именно, Волго-Уральского бассейна, однако, в названии диссертации — это не указано.
5. К существенному замечанию можно отнести тот факт, что начальные петроупругие модели доманиковой формации (которые в работе называются “базовые”) основываются на достаточно скудной коллекции образцов керна – всего 5 штук (глава 2). Несмотря на достаточно широкий спектр геохимических, литологических и геофизических исследований, проведенных для этих образцов, непонятно насколько они представительны и насколько можно относить выводы, полученные в результате исследования на этих образцах ко всей формации на территории Волго-Уральского НГБ. В работе даже не приведена глубина, с которой эти образцы были отобраны. Вероятно, этот факт связан с трудностью доступа к реальным данным, которые имеют коммерческую тайну. Именно поэтому необходим достаточно глубокий и вдумчивый литературный обзор геологической информации об объекте исследования.
6. В главе 3 автор вводит в свою петроупругую модель параметр трещинной пористости, обосновывая это тем, что в процессе созревания керогена твердое органическое вещество переходит в жидкое (нефть) и заполняет пространство на

контакте керогена и минеральных включений с последующим образованием трещин, за счет избыточного порового давления. При этом автор отдельно отмечает, что трещины находятся на контакте керогена и минеральных зерен. Во-первых, в работе не приведены иллюстрации, подтверждающие этот факт со соответствующими библиографическими ссылками, во-вторых, в главе 2, процесс созревания керогена заключался в увеличении количества изометричных пор в самом керогене. Возникает вопрос: "А почему трещины не могут образовываться в самом керогене в процессе его созревания? Почему необходимо рассматривать именно контакт кероген-минералы?". В работе это объясняется только наличием на практике анизотропии упругих скоростей, характерной для данной формации. "Может ли анизотропия быть вызвана не сколько трещинами, а прослоями пористого или непористого керогена и какой из этих факторов вносит больший вклад в анизотропию эффективных упругих скоростей" – на эти вопросы ответа в тексте работы нет.

7. В главе 3 присутствует много однотипной графики, особенно, в параграфе 3.5, которая затрудняет восприятие работы, при этом не несет существенных выводов. Методический вывод при использовании метода Хашина-Штрикмана является важным, но далеко не главным в данной работе.
8. Отдельно можно отметить, что автор никак не комментирует тот факт, что всё теоретическое моделирование не учитывает термобарические условия пласта.
9. В главе 5 по результатам многомасштабного моделирования делаются скорее опережающие выводы, что заявленные особенности состава и строения пород доманиковой формации будут проявлять себя на масштабе сейсмических исследований, так как приведенная модель сейсмогеологического пространства очень грубая. Безусловно, автор отмечает, что если бы эти особенности (пористость керогена, его объемная концентрация и др.) не проявились и для такой модели, то говорить о более сложных моделях геологического пространства бессмысленно. Однако, пока не приведены результаты полномасштабного моделирования для реальной среды (например, для скважины из главы 6), выводы автора звучат слишком преждевременно. Исследования автора необходимы, но не достаточны для подобных утверждений.
10. В качестве замечания можно отнести использование всего лишь одной скважины в главе 6.
11. В работе встречаются орфографические и стилистические ошибки в незначительном количестве.

Перечисленные выше замечания не умаляют достоинств диссертационного исследования Окуневича В.С., а скорее являются направлением дальнейшей разработки научной темы исследования.

Основной вывод отзыва оппонента

В целом, диссертационная работа В.С. Окуневича производит хорошее впечатление и представляет собой законченную научно-квалификационную работу.

В работе В.С. Окуневича решена задача об установлении взаимосвязей между параметрами внутреннего строения и состава пород доманиковых отложений и упругими характеристиками этих пород в разных масштабах (керна, ГИС, межскважинная томография, сейсмические исследования) с учетом возможной анизотропии упругих свойств этих пород,

вызванной различными факторами. Решение этой задачи имеет важное научное и практическое значение, поскольку позволяет повысить достоверность интерпретации разномасштабных экспериментальных данных, полученных для месторождений пород такого типа, и прогнозировать эти характеристики в зависимости от возможных изменений параметров в процессе поисков и разработки месторождений.

Выводы диссертации представляются обоснованными и полностью следуют из ее содержания. Список опубликованных статей, в которых изложены результаты исследований автора, подтверждающих сформулированные в диссертации защищаемые положения, удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Автореферат полностью отражает содержание, важнейшие результаты и выводы диссертационного исследования.

Таким образом, диссертация соответствует критериям, установленным п.9 Положения "О порядке присуждения ученых степеней" (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, с изменениями и дополнениями) для ученой степени кандидата наук, а ее автор Окуневич Всеволод Станиславович достоин присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.6.9 Геофизика.

Официальный оппонент

Шпуров Игорь Викторович

Доктор технических наук,

генеральный директор Федерального Бюджетного Учреждения Государственной комиссии по запасам полезных ископаемых,
заслуженный геолог РФ

E-mail: shpurov@gkz-rf.ru

Тел.: +79129263100

Адрес организации: 119180, Москва, ул. Большая Полянка, 54, стр.1, Федеральное Бюджетное Учреждение Государственная комиссия по запасам полезных ископаемых

Я, Шпуров Игорь Викторович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

«02» октября 2025 г.

Шпуров И.В.

Подпись Шпурова И.В. заверяю

Начальник отдела кадров



02.10.2025