

На правах рукописи



Дубиня Никита Владиславович

**ПРЯМЫЕ И ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ ИЗУЧЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННОЙ
ТРЕЩИНОВАТОСТИ МЕТОДАМИ ГЕОМЕХАНИКИ**

Специальность 1.6.9 Геофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук в лаборатории фундаментальных проблем нефтегазовой геофизики и геофизического мониторинга.

Научный консультант: **Тихоцкий Сергей Андреевич**,
доктор физико-математических наук, академик РАН
Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта
Российской академии наук

Официальные оппоненты: **Байков Виталий Анварович**,
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
Уфимский университет науки и технологий, профессор,
заведующий кафедрой «Искусственного интеллекта и
перспективных математических исследований»

Левин Владимир Анатольевич
доктор физико-математических наук,
Московский государственный университет им. М.В.
Ломоносова, механико-математический факультет,
профессор кафедры вычислительной механики

Пантелеев Иван Алексеевич
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Пермский федеральный исследовательский центр
Уральского отделения Российской академии наук,
заместитель директора по научной работе

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Институт проблем механики им. А.Ю.
Ишлинского Российской академии наук**

Защита состоится __ _____ 2026 г. в ____ часов на заседании диссертационного
совета 24.1.312.011 при ИФЗ 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 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
института www.ifz.ru.

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

Автореферат разослан «__» _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

Р.А. Жостков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В горных породах, в частности, в породах-коллекторах углеводородов, часто наблюдается наличие естественной трещиноватости, изучение которой представляет несомненный интерес для решения как фундаментальных вопросов развития необратимых деформаций в микронеоднородных средах, так и практических вопросов оптимизации разработки месторождений нефти и газа. Естественная трещиноватость горных пород – известная особенность их строения. В рамках данного исследования основное внимание будет уделено естественным трещинам сдвига, присутствующим в породе. Под естественной трещиной в геологической среде будет пониматься поверхность, при прохождении через которую поле перемещений претерпевает разрыв первого рода. Под сдвиговыми трещинами будут пониматься такие поверхности, при прохождении через которые только касательная компонента вектора перемещения претерпевает разрыв; нормальная компонента остается непрерывной функцией координаты. Под естественной трещиноватостью понимается совокупность таких поверхностей в элементарном объеме. При этом требования к элементарному объему совпадают с классическими требованиями, принятыми в механике сплошных сред: характерный масштаб рассмотрения совпадает с масштабом, для которого геологическая среда может быть описана системой уравнений равновесия или движения, условиями совместности деформаций и определяющими соотношениями. Полученные в рамках работы результаты согласуются с условиями, при которых все величины, входящие в перечисленные уравнения, могут быть строго математически определены в рамках классического подхода механики сплошных сред.

Знание того, как использовать разномасштабные геофизические исследования естественной трещиноватости не только для определения ее параметров на момент проведения исследования, но и при изменении состояния геологической среды как природного, так и техногенного характера, позволяет решать задачи геофизического мониторинга массивов горных пород, проводить сценарный анализ и использовать эти данные для повышения эффективности и безопасности освоения и разработки месторождений углеводородов. Полученные результаты представляются особенно актуальными на текущем этапе развития мирового топливно-энергетического комплекса, поскольку все большая доля разрабатываемых месторождений становится связана с объектами, в которых породы, насыщенные нефтью или газом, имеют низкую

матричную пористость и проницаемость, а также развитую трещиноватость, обеспечивающую пути для фильтрации флюида. Рассмотренные в работе прямые задачи геомеханического описания естественной трещиноватости и созданные алгоритмы могут быть напрямую применены к таким объектам.

Обратные задачи сводятся к использованию информации о естественной трещиноватости для оценки текущего напряженно-деформированного состояния массива горных пород. Задача оценки напряжений, действующих в верхних слоях Земной коры, представляет интерес и для изучения глобальных явлений, связанных с тектоническими и сейсмическими процессами, и для решения локальных вопросов геомеханических работ разного характера: бурения скважин, строительства сооружений и тому подобного. Существующие методы использования геофизической информации для оценок напряжений в горных породах обладают ограниченными областями применимости, в то время как предложенные в работе подходы использования данных о естественной трещиноватости в массиве горных пород для реконструкции ее напряженного состояния обладают собственной нишей и могут быть использованы в комплексе с другими существующими методами для повышения достоверности оценок напряженно-деформированного состояния и отдельных реологических свойств.

Степень разработанности темы исследования

На текущий момент наиболее распространены методы анализа геофизической информации – результатов сейсморазведочных работ, геофизических исследований скважин и специальных лабораторных исследований на образцах горных пород – для изучения отдельных параметров естественных трещин в состоянии на момент проведения исследования. Существуют отдельные методы изучения изменения эффективных свойств трещиноватых пород, развивающиеся преимущественно специалистами по петроупругому моделированию, по мере эволюции состояния геологической среды. При этом такие методы характеризуются высокой степенью неоднозначности и требуют внесения дополнительных ограничений на параметры естественной трещиноватости.

Подходы к интерпретации геофизических данных без построения петроупругих моделей, связывающих свойства естественных трещин с эффективными измеряемыми величинами – упругими, электрическими или фильтрационно-емкостными свойствами, – часто оказываются не в состоянии корректным образом учесть неопределенности в исходных данных и эквивалентность решений обратных задач при оценке отдельных

параметров естественных трещин. В качестве отдельного вопроса можно выделить флюидопроводимость естественных трещин, оценка которой без привлечения дополнительных подходов геомеханического моделирования представляется крайне затруднительной.

На сегодняшний день в практике разработки месторождений нефти и газа существуют единичные примеры работ, в которых приведены успешные примеры совместного прогнозирования положения, пространственных ориентаций и флюидопроводимости естественных сдвиговых трещин в массивах горных пород, а также их эволюции по мере изменения состояния самого массива. Использование только результатов комплексирования разномасштабных геофизических исследований позволяет строить детерминистические или вероятностные модели (с применением подходов геостатистики, петроупругого моделирования или машинного обучения) отдельных параметров, на основании которых строятся дискретные модели трещиноватости, впоследствии широко применяющиеся при гидродинамическом моделировании процессов фильтрации флюида в породах, характеризующихся развитой естественной трещиноватостью. Как правило, такие модели требуют дополнительной адаптации – доопределения отдельных параметров по результатам сравнения модельных показателей разработки с фактическими.

В качестве исходных данных используются: результаты лабораторных исследований на образцах горных пород; геофизические исследования скважин; результаты сейсмических съемок. Возможно выделение отдельных трещин или определение эффективных параметров среды, содержащей ансамбли трещин разного масштаба и генезиса. Статистические методы и подходы теории эффективных сред позволяют определять изменения параметров модели трещиноватости при вариации масштабов осреднения в пространственной и временной областях. В идеальных условиях строятся иерархические модели: по результатам объединения лабораторных и скважинных исследований устанавливаются соотношения между параметрами трещиноватости на разных масштабах, рассчитываются ожидаемые распределения параметров трещиноватости вдоль ствола скважины. При распространении модели трещиноватости в межскважинное пространство выполняются аналогичные процедуры, позволяющие учесть геологические особенности массива горных пород, определяемые по результатам анализа данных трехмерных сейсмических съемок. Дополнение этих материалов результатами проведения сейсмического мониторинга позволяет делать

выводы об изменениях отдельных параметров модели естественной трещиноватости с течением времени.

Вопросам использования разномасштабных данных для определения параметров трещиноватости с применением различных подходов в условиях анализа месторождений углеводородов посвящены работы таких отечественных исследователей как К.И. Багринцева, И.О. Баяк, И.А. Гарагаш, В.С. Жуков, Р.Д. Каневская, Ю.О. Кузьмин, Л.А. Молотков, В.Н. Николаевский, Д.К. Нургалиев, Б.П. Сибиряков, С.А. Тихоцкий, И.Ю. Хромова, В.А. Чеверда и многих других. Огромный опыт также накоплен в области исследования трещиноватости в вопросах анализа сейсмической активности. Подробный обзор существующих методов использования геофизических данных для оценки параметров трещиноватости выходит далеко за рамки настоящего исследования, посвященного двум вопросам: прямой задаче использования данных о механическом поведении массива трещиноватых горных пород для уточнения свойств естественных трещин и обратной задаче оценки состояния и механических свойств массива горных пород по данным о присутствующих в нем трещинах.

Использование данных о естественной трещиноватости для оценки параметров напряженного состояния трещиноватой среды представляется в геомеханике месторождений углеводородов достаточно новым направлением, в котором работает только несколько научных групп по всему миру. Как правило, для оценки напряжений по данным скважинных и лабораторных исследований используются существенные предположения о виде напряженного состояния массива горных пород и его реологических свойствах.

Задача оценки напряженного состояния и механических свойств горных пород в задачах геомеханики месторождений углеводородов обладает определенной спецификой. С одной стороны, в наличии достаточно большое количество исходных данных для интерпретации: результаты лабораторных испытаний на керне, геофизических исследований скважин, сейсмических съемок и мониторинга. С другой стороны, к результатам оценки напряженного состояния предъявляются серьезные требования относительно точности и детальности: такие прикладные задачи как расчет устойчивости ствола скважины, дизайн гидроразрыва пласта, прогноз условий начала необратимого деформирования пород околоскважинной зоны, проседание земной поверхности в ходе разработки месторождения требуют знания полей напряжений и деформаций в породах с детальностью порядка первых метров, что существенно

ограничивает возможности разработанных в смежных областях подходов, в частности, методов тектонофизики или дистанционного зондирования Земли. Подробное описание современного состояния подходов к использованию геофизической информации для оценки напряжений в задачах геомеханики месторождений углеводородов представлено в главе 5; здесь следует отметить, что обратная задача оценки напряжений и реологических свойств с использованием существующих подходов характеризуется наличием значимой области эквивалентных решений и чувствительностью к зашумлению исходных данных или требованием проведения высокодетальных и дорогостоящих исследований. Многие современные исследователи делают вывод о необходимости объединения различных методов оценки напряжений по геофизическим данным для повышения точности и достоверности результатов реконструкции. Разрабатываемые в рамках данного исследования подходы не претендуют на то, чтобы полностью вытеснить уже существующие алгоритмы и методики использования разномасштабных геофизических данных для реконструкции параметров напряженного состояния массива горных пород, но могут служить дополнительным источником информации, направленным на снижение неоднозначности решения поставленной обратной задачи.

Цель работы

Повышение эффективности и безопасности освоения и разработки месторождений углеводородов, сложенных породами-коллекторами, обладающими ярко выраженной естественной трещиноватостью

Основные задачи исследования

1. Создание математического аппарата, позволяющего использовать результаты лабораторных исследований механических свойств горных пород для определения положений и пространственных ориентаций естественных трещин сдвига, образующихся в геологической среде при накоплении в ней неупругих деформаций.
2. Создание математического аппарата, позволяющего определять пространственные ориентации трещин, являющихся флюидопроводящими в текущем поле напряжений, а также оценивать флюидопроводимость на вероятностном уровне с возможностью учета неоднозначности в исходных данных, используемых для прогноза.
3. Создание математического аппарата, позволяющего реконструировать подчиняющееся основным законам механики поле напряжений в слоистой

линейно упругой среде с возможной анизотропией по данным точечных оценок отдельных параметров ее напряженного состояния.

4. Создание подхода к совместной реконструкции компонент тензора напряжений (без использования априорных предположений о его виде) и отдельных реологических свойств элемента геологической среды по данным о представленных в нем естественных трещинах и их флюидопроводимости.
5. Исследование существования, единственности и устойчивости решения обратной задачи оценки напряженного состояния среды по данным о естественной трещиноватости.
6. Верификация разработанных подходов и алгоритмов путем их применения к реальным данным. Прямые задачи (1 – 2): проведение специальных лабораторных экспериментов и подтверждение корректности результатов моделирования свойств трещиноватости косвенными методами; обратные задачи (3 – 5): реконструкция напряженного состояния по данным фактических скважинных исследований на разных объектах и сравнение отдельных параметров, поддающихся оценке разными методами, с независимыми исследованиями.

Научная новизна работы заключается в создании принципиально нового алгоритма построения модели естественной трещиноватости, позволяющего использовать результаты геомеханического и гидродинамического моделирования для вероятностного прогноза положений, пространственных ориентаций и флюидопроводимости естественных трещин сдвига в геологической среде. Построенная модель является динамической, то есть позволяет изучать изменения указанных параметров в ходе эволюции механического состояния массива горных пород. Также научная новизна определяется созданием подхода к совместной реконструкции параметров напряженного состояния среды (без априорных предположений о его виде) и ее отдельных реологических свойств на основании данных о флюидопроводимости естественных сдвиговых трещин в текущих условиях.

Теоретическая и практическая значимость работы

На основе разработанных подходов в области обратной задачи геомеханического описания естественной трещиноватости проведена реконструкция напряженного состояния объектов, расположенных в зонах, представляющих теоретический и практический интерес: в потенциально сейсмогенной зоне активной субдукции, на геотермальном поле и на месторождениях углеводородов. Полученные

результаты позволили сделать выводы о напряженном состоянии в окрестностях крупных разломов, предложить конкретные решения по повышению безопасности и эффективности освоения и разработки месторождений полезных ископаемых. Выполнен теоретический анализ флюидопроводимости естественных трещин в окрестностях крупных разломов, в породах околоскважинного пространства и на разных глубинах. Предложен алгоритм, позволяющий на вероятностном уровне оценивать пространственные ориентации естественных трещин по данным разномасштабных геофизических исследований, который может быть использован в совокупности с методами петроупругого моделирования и геостатистики для создания синтетических моделей естественных трещин и распространения их параметров в межскважинное пространство. Прямым продолжением такого распространения является построение дискретных моделей трещин, широко применяемое в задачах оптимизации разработки месторождений нефти и газа. Рассмотрена обратная задача совместной реконструкции параметров напряженного состояния среды и ее отдельных реологических свойств: получены теоретически значимые результаты анализа существования, единственности и устойчивости ее решения. Данная проблема также обладает несомненной практической значимостью, обусловленной прямым использованием результатов реконструкции напряжений для решений следующих задач: оптимизации траектории бурения, расчета устойчивости ствола скважины, прогноза условий начала и темпов пескопроявления, дизайна гидроразрыва пласта, определения скорости изменения фильтрационно-емкостных свойств пород-коллекторов в ходе разработки, расчета проседаний Земной поверхности, прогноза наведенной сейсмичности и др.

Методология и методы исследования

В основе разработанного комплекса подходов и алгоритмов лежит связь между напряженным состоянием геологической среды и историей его изменения с одной стороны, а также с геометрическими и фильтрационно-емкостными свойствами естественных трещин сдвига с другой стороны.

При построении алгоритмов реконструкции положений и пространственных ориентаций трещин по результатам геомеханического моделирования используется неассоциированный закон пластического течения с упрочнением по углу внутреннего трения, предложенный в работах В.Н. Николаевского и И.А. Гарагаша. Методы петроупругого моделирования, связывающие внутреннюю структуру образца горной породы с ее динамическими упругими модулями, используются для верификации

результатов работы разработанных алгоритмов. Подтверждение корректности результатов их применения выполняется на основании анализа проведенных лабораторных исследований акустических свойств образцов горных пород в атмосферных условиях и в условиях псевдотрехосного сжатия.

При оценке флюидопроводимости трещин по данным о напряженном состоянии среды используются теоретические методы механики сплошных сред, адаптированные к средам, содержащим микронеоднородности. Дополнительно привлекаются методы математической статистики, позволяющие свести вероятностные оценки флюидопроводимости естественных трещин к определенным функциям независимых случайных величин, подчиняющихся заданным законам распределения. В отдельных случаях применяются подходы численного взятия несобственных интегралов.

При оценке напряженного состояния по данным о естественной трещиноватости применяются методы механики сплошных сред и подходы к анализу решений обратных задач (проверка на существование, единственность и устойчивость решения, факторный анализ). При решении обратных задач используется метод Монте-Карло.

Основные научные положения, выносимые на защиту

1. Модель неупругого деформирования горной породы с использованием закона неассоциированного пластического течения с упрочнением по углу внутреннего трения позволяет выделять зоны развития естественных трещин, формирующихся в образце горной породы при простом нагружении, определять их пространственные ориентации и оценивать интенсивность трещиноватости с учетом ее хрупкости.
2. При наличии подтвержденной связи между флюидопроводимостью естественных трещин сдвига и текущим напряженным состоянием геологической среды, возможные пространственные ориентации флюидопроводящих трещин могут быть аналитически рассчитаны из известных компонент тензора текущих напряжений без привлечения дополнительных ограничений на тип напряженного состояния.
3. Для расчета доли критически напряженных трещин, используемой в качестве вероятностного индикатора флюидопроводимости систем естественных трещин сдвига, достаточно информации о текущем напряженном состоянии трещиноватой среды, ее коэффициенте трения, и о статистическом законе распределения естественных трещин по пространственным ориентациям.

4. Для определения напряженного состояния слоистой линейно упругой среды достаточно информации об упругих модулях каждого слоя и не менее чем трех независимых оценок параметров напряженного состояния в предположении о субвертикальности одного из главных напряжений.
5. Разработанный алгоритм реконструкции параметров напряженного состояния и коэффициента трения трещиноватых горных пород позволяет получать результаты, подтверждаемые независимыми оценками напряжений геофизическими методами, причем решение обратной задачи может быть сформулировано в терминах математической статистики с корректным учетом неоднозначности в оцениваемых параметрах.

Степень достоверности и апробация работы

Достоверность результатов исследования обусловлена использованием строгих математических методов, проведением контрольных лабораторных экспериментов на образцах горных пород, а также сравнением результатов применения разработанных подходов к решению обратных задач оценки напряжений по данным о трещиноватости с независимыми оценками отдельных параметров геофизическими методами.

Данная диссертация подготовлена на основании работ автора, опубликованных в 2015-2025 годах по проблеме геомеханического описания естественной трещиноватости. Общее число статей по данной тематике – 39, из них 25 входят в перечень рецензируемых научных журналов ВАК и прошли строгую экспертизу в отечественных и международных журналах с высоким индексом цитирования.

Основные результаты работы докладывались на нескольких десятках российских и международных профильных научных конференциях, включая ежегодную конференцию Американского Союза Геофизиков AGU (2016), ежегодные конференции японского общества геофизиков JpGU Meeting (2016-2024), симпозиумы по геомеханике, проводящиеся под эгидой American Rock Mechanics Association (2018-2022), всероссийские нефтегазовые конференции союза инженеров-нефтяников SPE (2015, 2017-2021), конференции и выставки, проводящиеся европейской ассоциацией геоученых и инженеров EAGE (2018, 2020), а также всероссийские семинары-совещания «Триггерные эффекты в геосистемах» (2015, 2024), Балтийские школы-семинары «Петрофизическое моделирование осадочных пород» (2015, 2022, 2023, 2025), молодежные тектонофизические школы-семинары (2015, 2017, 2025), международные геолого-геофизические конференции и выставки «ГеоЕвразия» (2018-2022, 2024-2025), научно-технические конференции «Цифровые технологии в добыче

углеводородов» (2019, 2020-2021), международные школы молодых ученых «Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» (2017, 2022-2025).

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, 7 глав и заключения, содержит 339 страниц, 128 рисунков, 6 таблицу, список литературы из 333 наименований и 1 приложение.

Благодарности

Автор выражает благодарность своему научному консультанту д.ф.-м.н., академику РАН С.А. Тихоцкому за помощь и поддержку на всех этапах работ по теме исследования; сотрудникам института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, в особенности к.ф.-м.н. И.А. Алешину, д.ф.-м.н. А.Н. Галыбину, д.ф.-м.н. И.А. Гарагашу, д.ф.-м.н. А.Д. Завьялову, А.В. Загурному, к.т.н. П.А. Казначееву, д.ф.-м.н. А.В. Пономареву, д.ф.-м.н. Ю.Л. Ребецкому, И.В. Фокину, к.г.-м.н. М.Ю. Шур за многочисленные консультации и советы, сделавшие возможным подготовку диссертационной работы. Отдельную благодарность автор выражает сотрудникам лаборатории фундаментальных проблем нефтегазовой геофизики и геофизического мониторинга ИФЗ РАН – к.ф.-м.н. Д.А. Алексееву, д.ф.-м.н. И.О. Баяк, к.г.-м.н. Д.Е. Белобородову, И.А. Васильеву, И.А. Воронову, Л.Р. Календаровой, к.ф.-м.н. М.А. Красновой, А.М. Леоновой, Е.В. Новиковой, О.А. Тихоцкой, Н.А. Тюриной – за совместные научные исследования, легшие в основу работы. Автор признателен специалистам, оказавшим огромное влияние на работу: д.ф.-м.н. А.В. Вершинину, К.А. Ежову, к.т.н. А.В. Моисеенкову, д.ф.-м.н., проф. РАН Ю.П. Стефанову, д.т.н. Р.Д. Каневской, д.т.н. И.Г. Фаттахову, к.ф.-м.н. Т.Р. Ялаеву. Отдельно автор выражает благодарность сотрудникам института динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Московского физико-технического института, Российского государственного университета имени И.М. Губкина, Татарского научно-исследовательского и проектного института нефти публичного акционерного общества "Татнефть" имени В.Д. Шашина, центра науки и технологий добычи углеводородов Сколковского института науки и технологий. Автор не может не вспомнить своих учителей: к.ф.-м.н. В.О. Геогджаева, д.т.н. В.С. Жукова, д.ф.-м.н. Ш.А. Мухамедиева и д.ф.-м.н. И.В. Ширко, – памяти которых посвящает это исследование. Особую благодарность автор выражает В.А. Дубине, М.Г. Дубиня и Т.И. Герасимовой за личную поддержку.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Работа состоит из введения, семи основных глав, заключения, списка литературы и приложения, содержащего перечень публикаций автора по теме диссертации. Основные главы условно относятся к двум частям диссертации: главы с первой по четвертую относятся к первой части диссертации, посвященной прямым задачам использования результатов геомеханических исследований для прогноза свойств естественной трещиноватости; главы с пятой по седьмую относятся ко второй части диссертации, посвященной обратной задаче оценки упруго-реологических свойств и напряженно-деформированного состояния геологической среды по данным о естественной трещиноватости.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, основные положения, выносимые на защиту, показана научная новизна работы, раскрыта теоретическая и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе представлен краткий обзор принятых в практике освоения и разработки месторождений углеводородов методов построения моделей естественной трещиноватости с использованием информации о геологическом строении объектов исследования и геофизических исследований разных масштабов. **Параграф 1.1** является вводным и описывает проблематику задачи. В **параграфе 1.2.** рассмотрена классификация существующих подходов к построению модели трещиноватости на три группы: геологические, статистические и геомеханические модели. Рассмотрены плюсы и минусы каждого из подходов; сформулирована цель исследования в области прямых задач геомеханического описания естественной трещиноватости: развитие подходов построения моделей трещиноватости и объединение преимуществ моделей статистических и геомеханических моделей трещиноватости. Для достижения этой цели предложено использование методов петроупругого моделирования с использованием подходов теории эффективных сред, описанию которого посвящен **параграф 1.3.** На его основании сделан вывод о перспективности комплексирования статистического анализа прямых данных о естественных трещинах, петроупругого моделирования эффективных свойств пород с развитой естественной трещиноватостью и геомеханического моделирования. Результаты аналитического обзора обобщены в **параграфе 1.4,** в котором сформулированы основные цели работы и направления исследования прямых задач. В качестве главной цели первой части исследования

ставится задача использования разномасштабных данных о естественных трещинах сдвига для определения:

1. положения естественных сдвиговых трещин в массиве горных пород;
2. пространственных ориентаций сдвиговых трещин в представительном объеме среды;
3. способности трещин обеспечивать пути фильтрации для пластового флюида.

Ключевым подходом, используемым для определения этих факторов, является геомеханический анализ напряженно-деформированного состояния геологической среды и истории его изменения.

Решению поставленной задачи посвящены главы 2, 3 и 4.

В **главе 2** предложена математическая модель, позволяющая использовать данные о неупругом деформировании горных пород для определения положений и пространственных ориентаций естественных трещин, появляющихся в породе по мере накопления необратимых деформаций. Объект исследования – положения трещин сдвига в геологической среде и их пространственные ориентации – определен в **параграфе 2.1**.

Математическая модель, ее основные физические принципы и аспекты применения для прогноза параметров естественной трещиноватости представлены в **параграфе 2.2**. Здесь рассматриваются условия простого псевдотрехосного нагружения образцов горных пород в лабораторных условиях. Для описания неупругого деформирования используется неассоциированный закон пластического течения с упрочнением по углу внутреннего трения. Связь между приращениями напряжений и деформаций задается с учетом пластического упрочнения и дилатансии. Представлен алгоритм расчета коэффициента трения в условии пластичности Друккера-Прагера по наблюдаемой в лабораторных условиях зависимости напряжений от деформаций.

Отдельное внимание уделено углу трения, изменяющемуся при накоплении необратимых деформаций в среде. Показано, что в условиях псевдотрехосного сжатия угол трения связан с преимущественным углом развития плоскостей разрыва вектора смещений (трещин) по соотношению $\psi = \pi/4 + \varphi_{fr}/2$, где ψ – угол между нормалью к трещине и направлением действия максимального главного напряжения, а φ_{fr} – текущий угол трения в среде, связанный с напряжениями как:

$$\frac{1 + \arctg \varphi_{fr}}{1 - \arctg \varphi_{fr}} = \frac{\sigma_1 \sigma_3 + 2(\sigma_1^{el} - \sigma_3)^2 \left(1 - \sqrt{\left(\frac{\sigma_1^{el} - \sigma_3}{2} \right)^2 + \sigma_1 \sigma_3} \right)}{\sigma_3^2}, \quad (1)$$

где σ_1 и σ_3 – максимальное и минимальное главные напряжения соответственно (в работе используется терминология эффективных по Био напряжений, сжимающие напряжения считаются положительными), σ_1^{el} – максимальное главное напряжение, соответствующее пределу упругости.

Корректность работы математической модели неупругого деформирования определяется возможностью одновременного воспроизведения зависимостей и осевой, и радиальной деформации от осевого напряжения при проведении испытаний на псевдотрехосное сжатие.

В рамках предлагаемого алгоритма строится зависимость преимущественного направления развития трещиноватости ψ от накопленных необратимых деформаций, далее выполняется переход к интенсивности развития трещиноватости. Для этого вводится скалярный параметр $N_{fr}(\boldsymbol{\varepsilon})$ – относительное количество трещин, образовавшихся на том интервале изменения деформаций, на котором угол ψ меняется на малую величину $d\psi$. Этот параметр определяется следующим образом:

$$N_{fr}(\boldsymbol{\varepsilon}) = \frac{\chi(\boldsymbol{\varepsilon}) W_{inel} \Big|_{\psi(\boldsymbol{\varepsilon}) \in [\psi(\boldsymbol{\varepsilon}); \psi(\boldsymbol{\varepsilon}) + d\psi]}}{W_{inel} \Big|_{\psi \in [0; \psi(\boldsymbol{\varepsilon}) + d\psi]}}. \quad (2)$$

Здесь $\chi(\boldsymbol{\varepsilon})$ – зависящий от тензора деформаций $\boldsymbol{\varepsilon}$ индекс хрупкости, определяющий соотношение между энергией, затраченной на образование трещин, и энергией, связанной с пластическим деформированием и перемещением уже существующих дислокаций; W_{inel} – изменение неупругой энергии в образце, соответствующее изменению преимущественного угла развития трещиноватости. Эта величина вводится следующим образом:

$$W_{inel} \Big|_{\psi \in [\psi_k; \psi_{k+1}]} = \int_{\boldsymbol{\varepsilon}(\psi_k)}^{\boldsymbol{\varepsilon}(\psi_{k+1})} \boldsymbol{\sigma} : d\boldsymbol{\varepsilon} - \frac{1}{2} (\boldsymbol{\sigma}(\psi_{k+1}) - \boldsymbol{\sigma}(\psi_k)) : \mathbf{E}^{-1} : (\boldsymbol{\sigma}(\psi_{k+1}) - \boldsymbol{\sigma}(\psi_k)), \quad (3)$$

где используется тензор текущих эффективных напряжений $\boldsymbol{\sigma}$ и обратный тензор текущих упругих модулей \mathbf{E}^{-1} . Записанное выражение определяет изменение неупругой энергии, затраченное на изменение величины преимущественного угла развития трещин ψ с величины ψ_k до величины ψ_{k+1} . Для определения относительной выраженности систем разноориентированных трещин используется энергетический

принцип: диапазон возможных углов ψ разбивается на дискретное множество участков, ограниченных углами ψ_k с равным шагом $\Delta\psi$ ($\psi_{k+1} = \psi_k + \Delta\psi$), для каждого из которых по выражению (3) определяется изменение энергии на участке и полное изменение энергии с начала деформирования, используемые в выражении (2) для определения величины $N_{fr}(\epsilon)$, которую следует как понимать, как относительную поверхность плоскостей, при пересечении которых наблюдается разрыв вектора смещения, сформированных при изменении деформированного состояния от ϵ до $\epsilon + d\epsilon$.

Для демонстрации применимости разработанной модели проведены лабораторные исследования неупругого деформирования образцов горных пород и численное моделирование соответствующих процессов. В ходе экспериментального исследования цилиндрический образец помещается в обстановку псевдотрехосного сжатия. На начальном этапе радиальное и осевое напряжения синхронно поднимаются до некоторого уровня. Далее радиальное напряжение остается на постоянном, а осевое поднимается таким образом, чтобы обеспечить постоянство скорости изменения продольной деформации образца. Образец нагружается до тех пор, пока не начинает проявляться отклонение кривой «осевое напряжение – осевая деформация» от линейного закона. После того, как начинается соответствующее накопление необратимых деформаций, производится разгрузка образца до атмосферных условий. Далее проводится многоуровневое ультразвуковое сканирование в атмосферных условиях. Изменение полученных распределений скоростей распространения продольных и поперечных упругих волн позволяет говорить о том, как изменялась внутренняя структура образца горной породы при описанном нагружении и накоплении пластических деформаций и микроразрушений. Цикл повторяется несколько раз до разрушения образца.

Результатом экспериментального исследования являются зависимости деформаций образца от напряжений, а также скорости распространения продольных и поперечных упругих волн вдоль оси образца, а также вдоль разноориентированных диаметров. На Рисунке 1 для случая четырех последовательных циклов нагружения представлен пример азимутальных разверток а) скоростей продольных упругих волн, б) скоростей поперечных волн, в) относительных изменения скоростей продольных волн по сравнению с начальным состоянием, г) относительных изменений скорости поперечных волн. Заметны изменения пространственных распределений скоростей, проявление анизотропии упругих модулей, вызванной развитием в образце трещиноватости.

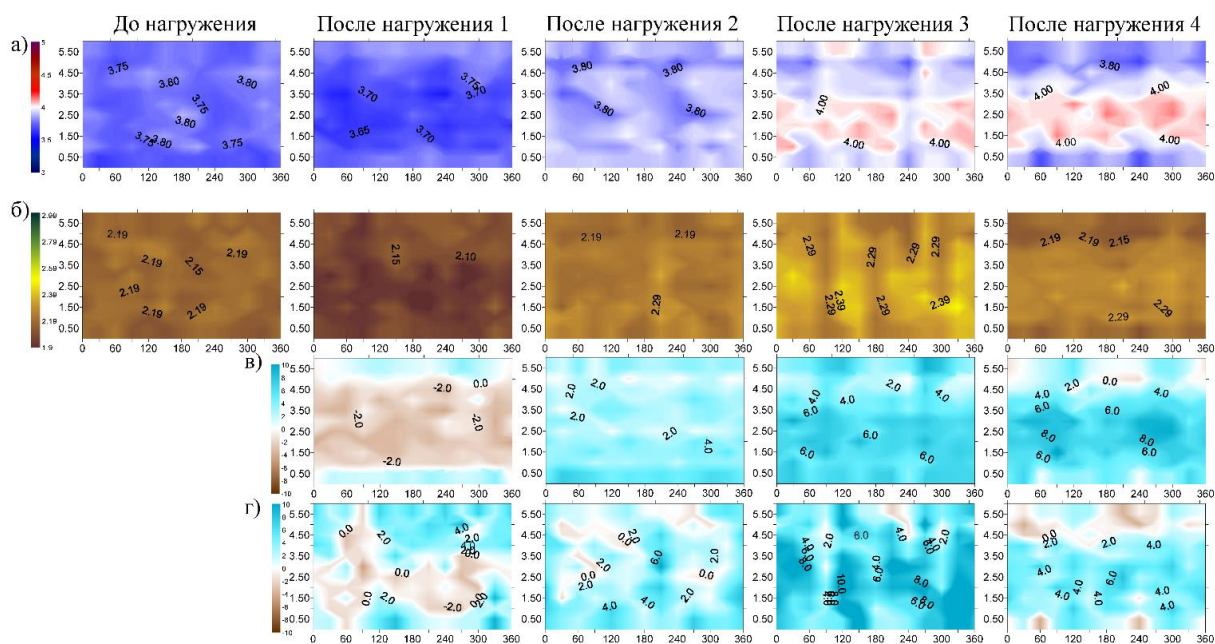


Рисунок 1 – Обобщение результатов ультразвукового сканирования по результатам серии из четырех последовательных нагружений

Для перехода от качественного анализа изменений скоростей распространения упругих волн в разных направлениях к количественной связи между накопленными деформациями и трещинами разных пространственных ориентаций псевдотрехосное сжатие образцов промоделировано численно с использованием метода спектральных элементов. В результате моделирования были рассчитаны поля напряжений и деформаций, определена связь между изменениями скоростей продольных и поперечных упругих волн с накопленными деформациями сдвига – Рисунок 2.

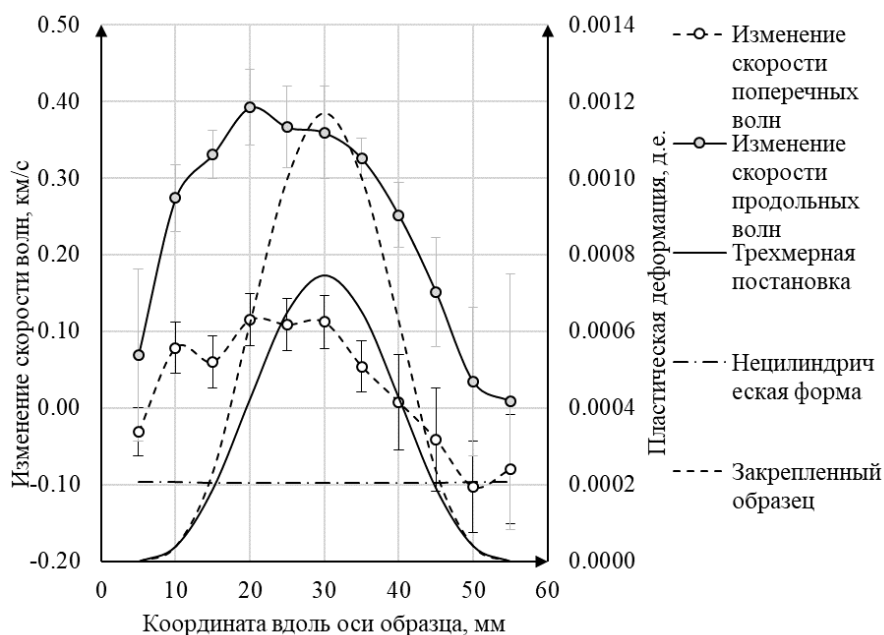


Рисунок 2 – Связь между деформациями и изменениями скоростей упругих волн

Соответствие расчетных напряжений и деформаций фактическим, а накопленных деформаций – наблюдаемым изменениям скоростей упругих волн позволило говорить о верификации модели. Пример интерпретации экспериментальных результатов по модели развития трещиноватости (2) – (3) представлен на Рисунке 3

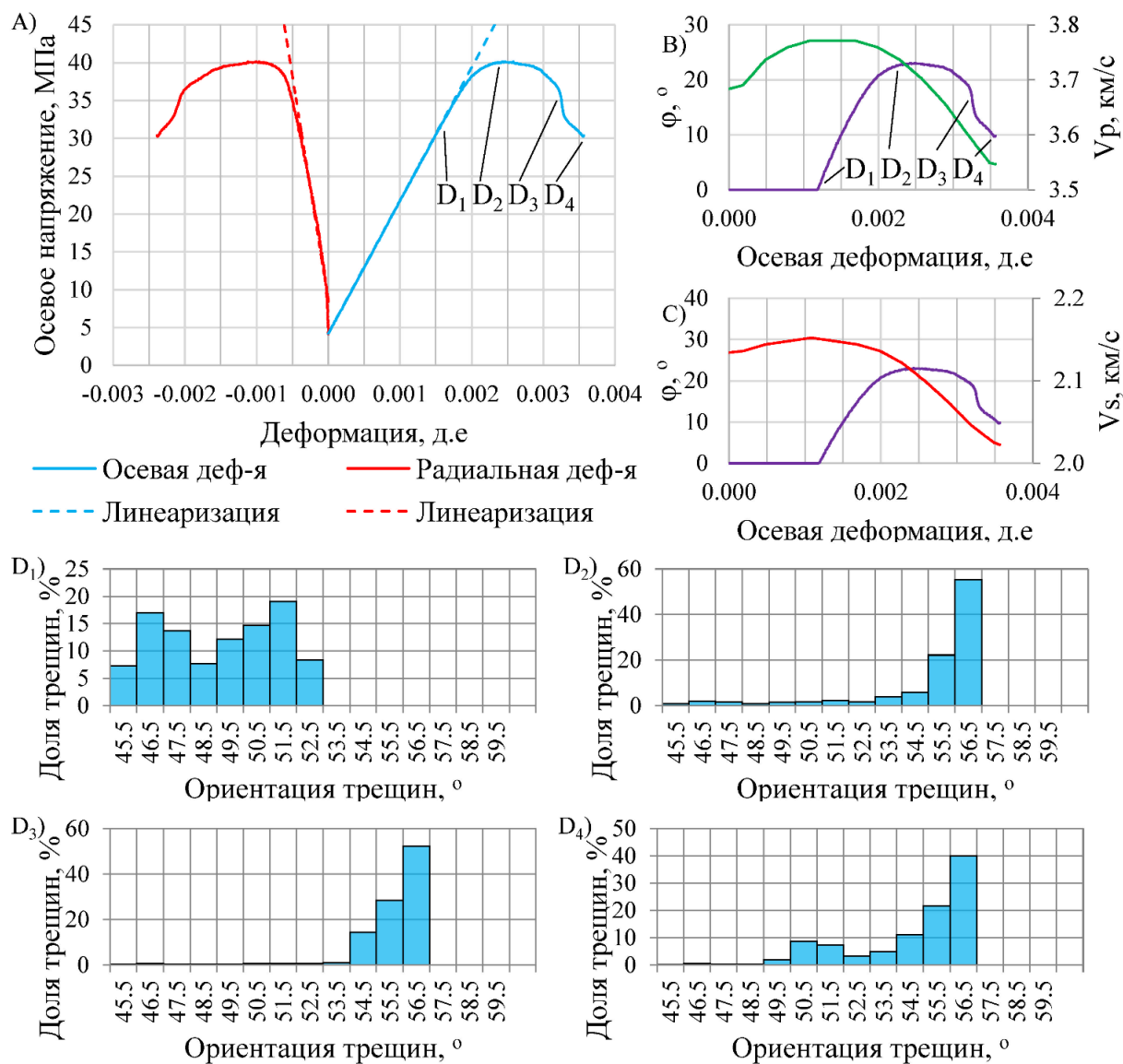


Рисунок 3 – Результаты интерпретации испытания по псевдотрехосному сжатию

Представлены: А) зависимости напряжений от деформаций; В, С) зависимости скорости продольных (зеленая линия) и поперечных (красная линия) упругих волн и угла трения φ_f (фиолетовая линия) от осевых деформаций образца. На рисунках D₁ – D₄ показаны распределения трещин в образце по пространственным ориентациям, рассчитанные по выражению (2) для четырех моментов нагружения, отмеченных на Рисунке 3А. В диссертации представлен анализ влияния предварительных циклов нагружения и начальной анизотропии на тренды развития трещиноватости.

Введенному в выражении (2) индексу хрупкости $\chi(\epsilon)$ посвящен **параграф 2.3**, в котором представлен алгоритм расчета этого параметра по зависимости напряжений от деформаций. Описаны существующие подходы к определению индекса хрупкости по различным данным, отмечены преимущества использования результатов лабораторных исследований. Предложена авторская методика нормировки индекса хрупкости, рассчитанного через соотношение между изменениями упругой и неупругой энергии в образце, накопленными к моменту разрушения. В основе методики лежит использование теоретических аналогов рассматриваемого материала: идеально хрупкой и идеально нехрупкой пород, деформирующихся аналогично исследуемой до достижения предела упругости. После его достижения идеально нехрупкая порода продолжает деформироваться пластично, повторяя реальную породу до момента ее разрушения. После точки разрушения реальной породы ее идеально нехрупкий аналог продолжает пластически деформироваться без разрушения достигая определенного потенциального уровня напряжений. Идеально хрупкая порода деформируется линейно упруго до этого уровня, а затем разрушается без накопления пластических деформаций. Представленный в работе энергетический анализ показывает, что эти аналоги могут быть использованы для корректной нормировки индекса хрупкости среды для последующего использования в выражении (2).

Результаты теоретических построений, лабораторных исследований и численного моделирования, обобщенные в **параграфе 2.4**, позволяют сформулировать и обосновать первое защищаемое положение:

Положение 1. Модель неупругого деформирования горной породы с использованием закона неассоциированного пластического течения с упрочнением по углу внутреннего трения позволяет выделять зоны развития естественных трещин, формирующихся в образце горной породы при простом нагружении, определять их пространственные ориентации и оценивать интенсивность трещиноватости с учетом ее хрупкости.

Если глава 2 посвящена прогнозу положений трещин сдвига, образующихся в среде по мере накопления деформаций, и их пространственных ориентаций, то в **главе 3** рассматривается флюидопроводимость этих трещин в текущем поле напряжений.

Раздел 3.1 полностью посвящен проблеме определения возможных пространственных ориентаций трещин, способных проводить флюид, для среды с известным напряженным состоянием и прочностными свойствами. В основе подхода к решению этой задачи лежит концепция критически напряженных трещин, согласно

которой естественная трещина сдвига является флюидопроводящей в заданном поле напряжений в том случае, если выполняется критерий сухого трения:

$$\tau_n \geq \mu \sigma_n, \quad (4)$$

где μ – коэффициент трения, σ_n – нормальное напряжение, действующее на плоскости трещины, τ_n – сдвиговое напряжение, действующее на ней. Если в классических работах это неравенство используется для того, чтобы определить будет ли трещина заданной пространственной ориентации флюидопроводящей в известном поле напряжений, то в параграфе 3.1 это выражение рассмотрено как неравенство относительно возможных пространственных ориентаций флюидопроводящих трещин. Найдено аналитическое решение, позволяющее для известного тензора напряжений (без априорных предположений о его виде) определить все возможные пространственные ориентации элементарных площадок, на которых выполняется неравенство (4). В решение входят только компоненты тензора напряжений σ в глобальной системе координат и коэффициент трения μ . Для визуализации решения используются широко распространенные на практике стереограммы – азимутальные равновеликие проекции Ламберта в нижней полусфере. Пример решения представлен на Рисунке 4.

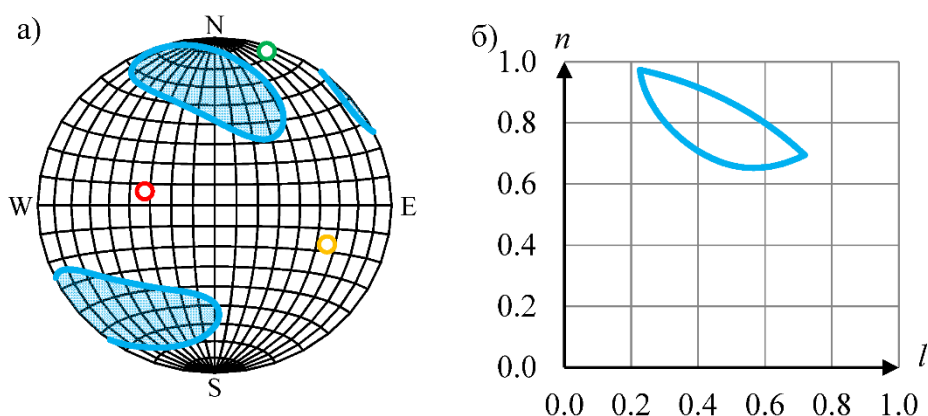


Рисунок 4 – Пример построения стереограммы (а) и области на плоскости направляющих косинусов (б) нормалей к критически напряженным трещинам

Красной точкой на стереограмме показано направление действия максимального главного напряжения σ_1 , оранжевой – промежуточного главного напряжения σ_2 , зеленой – минимального главного напряжения σ_3 . Голубым цветом показана область, в которой находятся нормали к трещинам, являющимся критически напряженными при следующих компонентах тензора напряжений: $\sigma_{11} = 25$ МПа, $\sigma_{22} = 18$ МПа, $\sigma_{33} = 8$ МПа, $\sigma_{12} = \sigma_{21} = -7$ МПа, $\sigma_{13} = \sigma_{31} = 1$ МПа, $\sigma_{23} = \sigma_{32} = -3$ МПа (в системе координат, первая ось которой направлена на восток, вторая – на север, третья вертикальна). На Рисунке

4(б) аналогичным образом показана область допустимых значений косинуса между нормалью к трещине и направлением действия максимального главного напряжения l и аналогичного n косинуса между нормалью и направлением действия σ_3 .

В параграфе представлена верификация полученного решения путем сравнения с фактическими данными о флюидопроводимости естественных трещин на геотермальном поле Ротокава (Новая Зеландия). Предложен параметр S_{crit} , аналитически выражающийся из известных величин главных напряжений и коэффициента трения, связанный с относительным количеством трещин, являющихся флюидопроводящими в заданном поле напряжений.

Показано, что данный параметр соответствует относительному количеству флюидопроводящих трещин, для репрезентативного объема «идеальной» породы, характеризующейся равномерным распределением направляющих косинусов l и n естественных трещин сдвига. Модификации этого параметра, отвечающие более физически обоснованным моделям, представлены ниже.

В параграфе 3.1 возможные пространственные ориентации флюидопроводящих трещин использованы для анализа различных геомеханических факторов. Отдельно рассмотрены: изменения направлений действия главных напряжений с сохранением их величин; изменения соотношений между главными напряжениями (выражаемые через коэффициент формы эллипсоида напряжений $\phi_\sigma = (\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)$ и соотношение между максимальным и минимальным главными напряжениями $N_\sigma = \sigma_1/\sigma_3$); изменение коэффициента трения. Для наборов этих параметров, определяющих напряженное состояние, построены стереограммы и рассчитана величина S_{crit} ; определены их изменения, соответствующие изменениям варьируемых параметров. Отдельно рассмотрены зависимости погрешности в определении количества критически напряженных трещин от погрешности в определении коэффициента трения.

Найденное аналитическое решение неравенства (4) использовано для изучения трендов флюидопроводимости естественных трещин сдвига в различных условиях в **параграфе 3.2**. Рассмотрены три случая: возможные пространственные ориентации флюидопроводящих трещин на разных глубинах; поведение таких трещин в зоне концентрации напряжений в окрестности скважины; изменения поведения трещин по мере приближения к крупным разломам.

В первом случае показано, что контраст между средним горизонтальным напряжением и вертикальным напряжением (в предположении о том, что последнее является одним из главных) оказывает принципиальное влияние на

флюидопроводимость естественных сдвиговых трещин. В случае низких горизонтальных напряжений на небольших глубинах (100 – 500 метров в зависимости от коэффициента трения) отсутствует возможность флюидопроводимости трещин сдвига. В противоположном случае высокого уровня горизонтальных напряжений вероятность флюидопроводимости трещин снижается с ростом глубины и становится нулевой на глубинах, превышающих 1 км (для типичного коэффициента трения $\mu = 0.6$). Рассмотренные случаи являются экстремальными и описаны для ограничения возможного относительного количества флюидопроводящих трещин сдвига на разных глубинах в зависимости от наблюдаемых тектонических условий.

Более практически применимой является вторая задача о флюидопроводимости естественных сдвиговых трещин в породах околоскважинной зоны. Показано, что соотношения между величинами главных напряжений, действующих на отдалении от скважины, наравне с давлением в породах околоскважинного пространства определяют активацию (переход в категорию флюидопроводящих) трещин, оказавшихся на расстоянии нескольких радиусов скважины от ее центра. Продемонстрировано, что наибольшие позитивные изменения флюидопроводимости естественных трещин достигаются, если скважина ориентирована в направлении действия промежуточного главного напряжения. Как и в предыдущем случае, построены стереограммы, задающие пространственные ориентации флюидопроводящих трещин в разных условиях.

Аналогичным образом рассмотрены тренды изменения пространственных ориентаций и относительного количества флюидопроводящих трещин по мере приближения к крупным разломам, вносящим изменения в локальное поле напряжений. Рассмотрены разломы различных пространственных ориентаций, напряженно-деформированное состояние пород около разломов рассчитано по результатам численного моделирования методом конечных элементов. Показано, что приближение к разломам сбросового типа сопровождается ростом и относительного количества флюидопроводящих трещин, и разнообразия их пространственных ориентаций; рядом с разломами сдвигового типа пространственные ориентации трещин меняются существенно, однако их общее количество не претерпевает существенных изменений; наконец, по мере приближения к разломам взбросового типа меняется и количество флюидопроводящих трещин, и их пространственные ориентации, однако изменение не является монотонным.

Отмеченная выше проблема использования относительного количества флюидопроводящих трещин S_{crit} решается в **параграфе 3.3**. Здесь рассматривается

вероятностный подход к прогнозу флюидопроводимости естественных трещин в текущем поле напряжений при условии, что известны статистические закономерности распределения естественных трещин по пространственным ориентациям. Относительное количество флюидопроводящих трещин S_{crit} меняется на параметр P_{fr} , определяющий вероятность того, что случайно выбранная из ансамбля трещина является флюидопроводящей. Для иллюстрации и получения полуаналитического решения рассматривается физически и геологически обоснованная модель естественной трещиноватости, для которой распределение нормалей к плоскостям трещин по единичной сфере подчиняется закону Фишера, причем полюс распределения совпадает с нормалью к оптимально ориентированной трещине – трещине с максимальными Кулоновскими напряжениями. В этом случае вероятностный параметр P_{fr} задается выражением:

$$P_{fr}(\sigma, \mu, h, \varphi) = \sqrt{|\mathbf{t}(h, \varphi)|^2 - \sigma_n(h, \varphi)^2} - \mu \sigma_n(h, \varphi) \geq 0, \quad (5)$$

где введен вектор напряжений на трещине \mathbf{t} и две случайные скалярные величины h и φ , используемые для задания распределений нормалей к трещинам по единичной сфере. Показано, что вероятность P_{fr} может быть полуаналитически найдена для случая распределения Фишера (с использованием формулы Симпсона для численного взятия несобственных интегралов). Предложен алгоритм определения этой вероятности для случая произвольного распределения трещин по пространственным ориентациям, в частности, для распределения, полученного по экспериментальным зависимостям напряжений от деформаций с применением алгоритма, описанного в главе 2. В качестве иллюстративного примера представлен анализ изменения вероятности того, что случайно выбранная трещина является флюидопроводящей, по мере изменения насыщающего породу флюида.

В заключительном в главе **параграфе 3.4** представлено обобщение полученных результатов анализа задачи прогноза флюидопроводимости естественных трещин сдвига в текущем поле напряжений. Представленные результаты позволяют сформулировать следующие защищаемые положения:

Защищаемое положение №2

При наличии подтвержденной связи между флюидопроводимостью естественных трещин сдвига и текущим напряженным состоянием геологической среды, возможные пространственные ориентации флюидопроводящих трещин могут

быть аналитически рассчитаны из известных компонент тензора текущих напряжений без привлечения дополнительных ограничений на тип напряженного состояния.

Защищаемое положение №3

Для расчета доли критически напряженных трещин, используемой в качестве вероятностного индикатора флюидопроводимости систем естественных трещин сдвига, достаточно информации о текущем напряженном состоянии трещиноватой среды, ее коэффициенте трения, и о статистическом законе распределения естественных трещин по пространственным ориентациям.

Непосредственное применение сформулированных подходов и методов требует использования реальных геофизических данных о естественных трещинах и напряженном состоянии пород-коллекторов углеводородов, а также об их фильтрационно-емкостных свойствах. Как правило, подобная информация напрямую используется при оптимизации режима разработки месторождений специалистами нефтегазовых компаний и не может быть опубликована в открытом виде.

В **главе 4** представлен алгоритм, позволяющий объединить результаты, описанные в главах 2 и 3, для построения согласованной геомеханической и гидродинамической модели трещиноватости, которая позволяет изучать изменения флюидопроводимости естественных трещин в реальных геологических средах в ходе разработки месторождений углеводородов. Постановка задачи сформулирована в **параграфе 4.1**.

Параграф 4.2 содержит в себе поэтапное описание алгоритма построения трещиноватости по разномасштабным геофизическим данным с учетом изменения напряженно-деформированного состояния геологической среды, а также истории накопления в ней необратимых деформаций.

Интенсивность накопленных необратимых деформаций в каждом элементе геомеханической модели связывается с относительной выраженностью естественной трещиноватости. При этом для того, чтобы перейти от общих необратимых деформаций к интенсивности трещинообразования используется индекс хрупкости. Каждый элемент трехмерной модели предлагается характеризовать не плотностью вероятности, рассчитанной из функции распределения (5), или для реального распределения трещин по пространственным ориентациям, а произведением плотности вероятности на $N_{fr}(\epsilon)$ из выражения (2). Для распределения Фишера:

$$p_{fr}(w, \boldsymbol{\varepsilon}) = \chi(\boldsymbol{\varepsilon}) \frac{E_{inel} |_{\psi(\boldsymbol{\varepsilon}) \in [\psi(\boldsymbol{\varepsilon}); \psi(\boldsymbol{\varepsilon}) + d\psi]}}{E_{inel} |_{\psi \in [0; \psi(\boldsymbol{\varepsilon}) + d\psi]}} \frac{1}{2\pi} \int_{-1}^1 \frac{\kappa \exp(\kappa(h-1))}{1 - \exp(-2\kappa)} \left[\int_0^{2\pi} \delta(w - P_{fr}(\boldsymbol{\sigma}, \mu, h, \varphi)) d\varphi \right] dh, (6)$$

где символом δ обозначена дельта-функция, κ – параметр кучности распределения. Если функция $N_{fr}(\boldsymbol{\varepsilon})$, определяемая выражением (2), определяет безразмерный параметр выраженности естественной трещиноватости в каждом элементе модели, то предложенная здесь величина $p_{fr}(w, \boldsymbol{\varepsilon})$ определяет то, какова вероятность того, что случайная трещина в этом элементе является критически напряженной с учетом реального распределения трещин по пространственным ориентациям.

В параграфе 4.3 продемонстрировано из ключевых преимуществ данного подхода – аналитическая или полуаналитическая форма представленных выражений позволяет проводить анализ трещиноватости разработанным методом без существенного увеличения вычислительных затрат в рамках стандартной процедуры геомеханического моделирования. Рассмотрено поведение естественных трещин на участке одного из месторождений углеводородов Российской Федерации, сложенного породами с ярко выраженной естественной трещиноватостью. Выполнены работы по одномерному геомеханическому моделированию (построению зависимостей механических свойств пород вдоль траекторий пробуренных скважин); построению трехмерной модели механических и фильтрационно-емкостных свойств с использованием разномасштабных геофизических исследований и подходов петроупругого моделирования; построению трехмерной геомеханической модели, подразумевающей задание таких удовлетворяющих уравнениям равновесия граничных условий, при которых наблюдается наилучшее соответствие расчетных полей напряжений одномерным моделям. Трехмерное численное моделирование выполнялось методом конечных элементов.

В результате моделирования были рассчитаны равновесные поля напряжений в каждом элементе модели, определены накопленные в нем пластические деформации, найден коэффициент трения – фактически были получены все данные, необходимые для применения разработанных алгоритмов. Как и в предыдущем параграфе для анализа было выбрано поведения флюидопроводящих трещин при изменениях напряженно-деформированного состояния среды на примере разработки месторождения и соответствующих изменений насыщающего породу флюида. Для иллюстрации на Рисунке 5 показаны карты (горизонтальные сечения расчетной объемной модели), на которые цветом нанесены найденные вероятности того, что

случайно выбранная трещина будет являться флюидопроводящей для 4 случаев: а) равномерного падения давления во всех элементах модели на 25 МПа по сравнению с гидростатическим давлением; б) падения давления на 10 МПа; в) роста давления на 10 МПа; г) роста давления на 25 МПа.

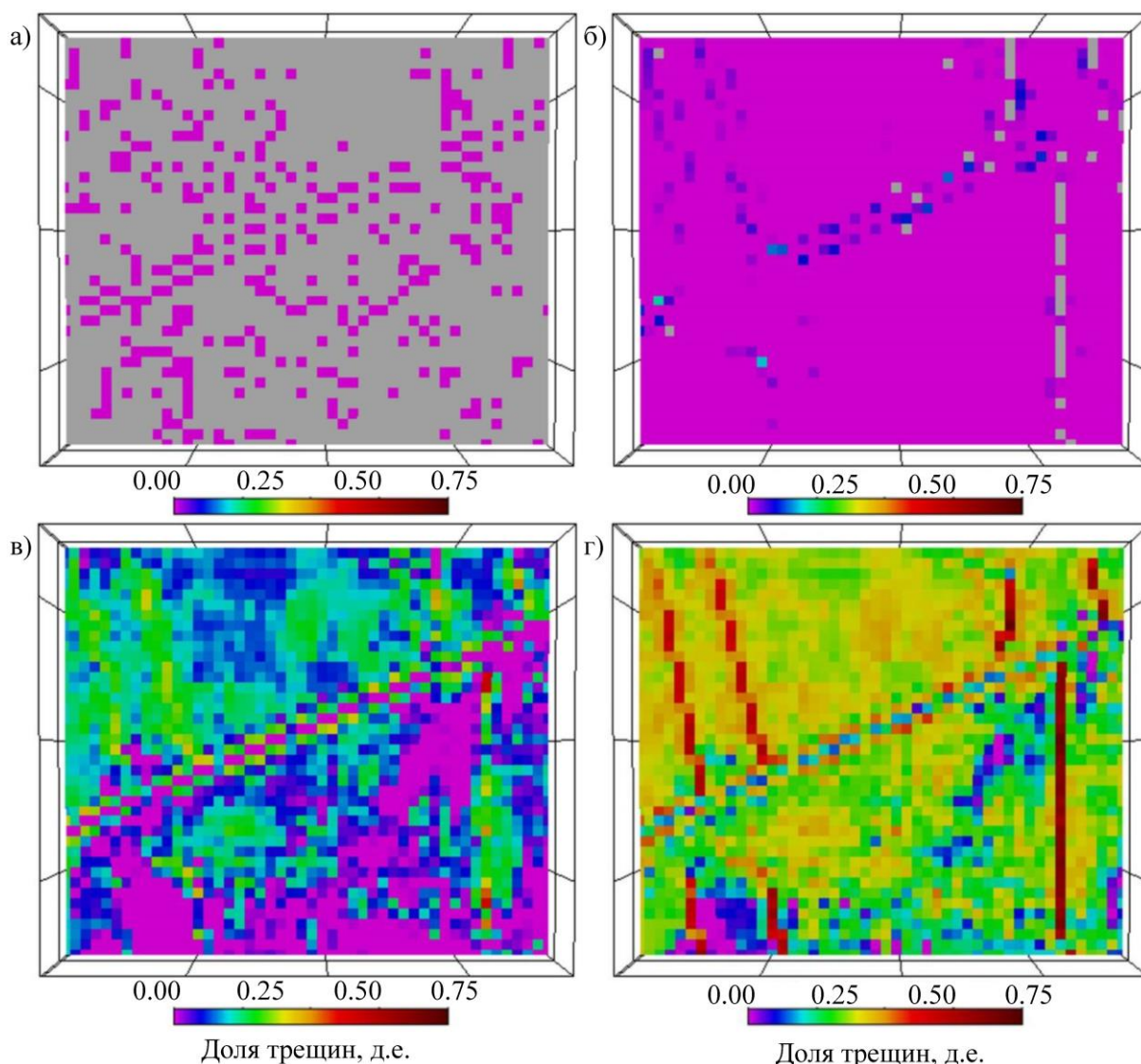


Рисунок 5 – Пространственное распределение относительного количества критически напряженных трещин для различных уровней давления флюида

Из Рисунка 5 можно сделать вывод о приуроченности систем развитой трещиноватости в приразломных зонах, положение которых можно определить по зонам концентрации трещин, особенно для случаев повышения давления флюида. При этом интересно отметить, что не все разломы проявляются в равной степени существенно: видно, что субмеридиональные разломы оказывают наиболее сильное влияние на интенсивность естественных трещин и их флюидопроводимость.

В параграфе 4.4 обобщаются предложенные подходы к геомеханическому описанию систем естественных трещин. Показана возможность первичного анализа разномасштабных геофизических данных и геомеханического моделирования для определения: пространственных ориентаций сдвиговых трещин; относительного количества сдвиговых трещин; выделения среди этих трещин флюидопроводящих с расчетом их пространственных ориентаций и относительного количества. Использование вероятностного подхода позволяет использовать эти результаты для генерации синтетических систем трещин, подчиняющихся тем же законам, что может быть в дальнейшем использовано для создания дискретных моделей естественных трещин с выделением среди них флюидопроводящих. В качестве перспективного направления дальнейших исследований предлагается переход на терминологию теории эффективных сред с расчетом таких параметров как трещинная пористость, связность пустотного пространства и аспектное отношение включений.

Пример применения сформулированных алгоритмов к фактическим данным позволил выполнить верификацию использованных подходов на практике, что подкрепляет сформулированные выше положения, выносимые на защиту.

В параграфе также отмечается возможность сформулировать обратную задачу: если параметры естественных трещин, рассмотренные в этих главах, известны по геофизическим данным, существует возможность сужения неопределенности в оценке напряжений и коэффициента трения по геофизическим данным. Этому посвящены последующие главы, в которых сформулирована и решена обратная задача геомеханического описания естественной трещиноватости.

Сама по себе обратная задача геомеханического описания естественной трещиноватости сформулирована в главе 5 для одномерного случая. В параграфе 5.1 дано краткое описание места одномерной геомеханике месторождений углеводородов в общей картине геофизических методов изучения напряженно-деформированного состояния верхних слоев Земной коры. Отмечено, что около 15% из 42870 данных о направлениях главных осей тензора напряжений, занесенных в мировую базу данных по напряжениям в литосфере (World Stress Map) получены на основании интерпретации результатов геофизических исследований скважин. Ценность скважинных исследований параметров напряженного состояния верхних слоев земной коры повышается в сейсмически спокойных регионах, в которых происходит активная разработка месторождений углеводородов, где использование методов изучения напряженного состояния, основанных на анализе природных индикаторов, осложняется

их слабой выраженностью. Формулируется одномерная задача геомеханики: использование разномасштабных геофизических данных о свойствах и состоянии пород околоскважинной зоны для восстановления величин и направлений действия главных напряжений как функций от координаты вдоль скважины (далее эти функции будем называть профилями напряжений).

Методология решения этой задачи представлена в **параграфе 5.2**. В нем подчеркивается практически повсеместное использование гипотезы о субвертикальности одного из главных напряжений для реконструкции профилей напряжений. Отмечается, что вертикальное напряжение определяется весом вышележащих пород, давлением насыщающего породу флюида и коэффициентом Био. Как правило, реконструкция профиля вертикального напряжения не представляет особых трудностей. С другой стороны, задача реконструкции главных горизонтальных напряжений является на порядок более сложной. В параграфе отмечается, что реконструкция профилей горизонтальных напряжений выполняется в три этапа: 1) выбор модели зависимости горизонтальных напряжений от глубины; 2) выбор конечного набора параметров, задающих напряженное состояние на разных глубинах (далее: управляющих параметров); 3) поиск такого набора значений управляющих параметров, при котором наблюдается наилучшее соответствие расчетных напряжений и направлений их действия прямым и косвенным геофизическим индикаторам напряженного состояния.

В параграфе отмечается, что в мировой практике распространены две модели: пороупругая модель, в которой горизонтальные напряжения определяются через горизонтально действующие тектонические деформации (являющиеся для этой модели управляющими параметрами) и профили модулей упругости, и линейная модель, в которой отношения горизонтальных напряжений к вертикальному не зависят от глубины (эти отношения являются управляющими параметрами для линейной модели). Отмечаются преимущества и недостатки обеих моделей, предлагается авторская слоистая модель реконструкции профилей горизонтальных напряжений, в рамках которой рассматривается напряженное состояние двух сцепленных линейно упругих слоев с контрастными упругими модулями.

Рассмотрен случай двух слоев с известными упругими модулями, находящихся под действием силы тяжести. В верхнем слое упругие модули обозначаются как E_1 , ν_1 , в нижнем слое как E_2 , ν_2 . В каждом слое рассматриваются компоненты тензора

напряжений $\sigma_x^i, \sigma_y^i, \tau_{xy}^i, \sigma_z^i = \sigma_v^i$. Индекс $i = 1, 2$ соответствует номеру рассматриваемого слоя. Показано, что из непрерывности вектора смещений следует, что напряжения в нижнем слое могут быть выражены через напряжения в верхнем слое как:

$$\begin{pmatrix} \sigma_x^2 \\ \sigma_y^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \nu_1 \nu_2 & \nu_2 - \nu_1 \\ \nu_2 - \nu_1 & 1 - \nu_1 \nu_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_x^1 \\ \sigma_y^1 \end{pmatrix} \frac{1}{1 - \nu_2^2} \frac{E_2}{E_1} + \frac{\nu_2 E_1 - \nu_1 E_2}{E_1 (1 - \nu_2)} \sigma_v \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

$$\tau_{xy}^2 = \frac{E_2}{E_1} \frac{1 + \nu_1}{1 + \nu_2} \tau_{xy}^1.$$

Вид этих выражений позволяет сделать вывод о невозможности изменения направлений действия главных горизонтальных напряжений при переходе через границу между слоями в рассмотренной постановке. Кроме того, существует возможность обобщения задачи на случай большого количества слоев и формулировки конечно-разностной задачи, в рамках которой напряжения внутри каждого слоя растут с глубиной линейно, а при переходе через каждую границу претерпевают скачки.

В параграфе также представлены обобщения модели для нескольких случаев: случай трансверсальной изотропии одного слоя; обоих слоев; несовпадения оси симметрии трансверсально изотропной среды и нормали к плоскости границы между слоями. Для перечисленных случаев получены аналитические решения, подобные выражениям (7). Слоистая модель предложена в качестве компромисса между линейной и пороупругой моделями реконструкции горизонтальных напряжений, в роли управляющих параметров могут выступать не менее трех независимых оценок отдельных компонент тензора напряжений геофизическими методами.

Обзор этих методов представлен в **параграфе 5.3**, в котором описано современное состояние четырех наиболее часто встречающихся на практике подходов к использованию прямых и косвенных индикаторов напряженного состояния для оценки отдельных компонент тензора природных напряжений: 1) оценка минимального главного напряжения по кривым, наблюдаемым в ходе проведения гидроразрыва пласта и теста на приемистость; 2) оценка напряжений по геометрическим особенностям вывалов и трещин растяжения, образовавшихся при бурении; 3) оценка горизонтальных напряжений по особенностям динамических упругих модулей пород околоскважинной зоны; 4) оценка горизонтальных напряжений по результатам лабораторных исследований образцов горной породы.

Выполненный анализ областей применимости этих подходов и их недостатков приводит к следующему выводу: для наиболее полноценного использования скважинных данных для оценки параметров напряженного состояния верхних слоев

земной коры необходимо использовать комплекс всех применимых для каждой конкретной скважины методов. Кроме того, необходимо далее развивать скважинные методы исследования напряженного состояния.

Обратная задача использования результатов различных геофизических исследований для оценки параметров, определяющих напряженное состояние массива горных пород, обсуждается в **параграфе 5.4**. Показана перспективность использования слоистой модели, для которой может быть сформулировано следующее защищаемое положение:

Защищаемое положение №4

Для определения напряженного состояния слоистой линейно упругой среды достаточно информации об упругих модулях каждого слоя и не менее чем трех независимых оценок параметров напряженного состояния в предположении о субвертикальности одного из главных напряжений.

Получение подобных оценок сопряжено с определенными трудностями. Результаты реконструкции напряжений чувствительны к ошибкам в исходных данных. Учитывая, что в главах 2 – 4 была дана исчерпывающая информация о связи флюидопроводимости и геометрических характеристик естественных трещин с современным напряженным состоянием, причем существуют методы оценки этих параметров геофизическими методами, представляется перспективной идея использования этой информации для уточнения напряжений.

Методологические аспекты использования информации о флюидопроводимости естественных трещин для оценки параметров, определяющих напряженное состояние среды, рассматриваются в **главе 6** и в вводном **параграфе 6.1**.

В параграфе 6.2 представлен алгоритм реконструкции отдельных параметров напряженного состояния основании скважинных исследований трещиноватости. Этот алгоритм состоит из 7 этапов:

I. Рассматриваемый интервал глубин, на котором присутствует информация о естественных трещинах, разбивается на множество интервалов, в каждом из которых присутствует одна трещина.

II. Каждый выделенный интервал глубин характеризуется определенным индексом аномальности, отражающим степень выраженности флюидопроводимости естественных трещин. Вводится понятие геофизического индикатора – параметра, аномальное поведение которого в окрестности трещины связывается с ее флюидопроводимостью. Анализируются комплексные данные о трещинах и для

каждой из них определяется бинарный индекс аномальности (равный единице для флюидопроводящих трещин и нулю для непроводящих) и небинарный индекс аномальности, связанный с выраженностью флюидопроводимости.

III. Определяется связь между параметрами, определяющими напряженное состояние среды (параметры меняются в зависимости от модели реконструкции напряжений), и критической напряженностью каждой трещины (неравенство (4)).

IV Для каждой трещины и любой комбинации управляющих параметров рассчитывается «индекс критичности»: бинарный индекс приравнивается к единице, если неравенство (4) выполняется, в противном случае он принимается равным нулю; небинарный индекс связывается с уровнем Кулоновских напряжений.

V. Решается задача оптимизации: выполняется поиск таких значений управляющих параметров, при которых между критически напряженными и флюидопроводящими трещинами наблюдается наилучшее соответствие. Определяется мера соответствия (целевая функция), характеризующая качество соответствия.

VI. Выполняется возвращение к этапу **III** и целевая функция определяется для всех допустимых значений управляющих параметров.

VII. Проводится поиск глобального максимума целевой функции. Этот глобальный максимум достигается для напряженного состояния, при котором обеспечивается наилучшее соответствие между критически напряженными трещинами и флюидопроводящими трещинами, выделенными на основании интерпретации результатов геофизических исследований скважин. Соответствующее напряженное состояние рассматривается в качестве решения обратной задачи реконструкции напряжений в породах околоскважинной зоны на основании анализа естественной трещиноватости.

В параграфе рассматриваются 4 варианта целевых функций, основанных на литературных источниках и авторских формулировках. Показано, что наиболее удобно формулировать задачу в терминах углов между N -мерными (N – общее количество наблюдаемых трещин) векторами, полученными из индексов аномальности и критичности. С использованием синтетической модели трещиноватости, построенной с использованием распределений Фишера изучена возможность получения верного решения обратной задачи, исследована области ее эквивалентных решений и рассмотрена устойчивость решения по отношению к зашумлению исходных данных. Показано, что погрешность в определении флюидопроводимости естественных трещин по геофизическим данным не ведет к существенному ухудшению качества решения,

пока относительная ошибка интерпретации флюидопроводимости не достигает уровня 20%, что соответствует текущему уровню развитию методов анализа трещиноватости.

Параграф 6.3 представляет обобщение предыдущего алгоритма на случай совместной реконструкции и тензора напряжений, и коэффициента трения, также входящего в неравенство (4). Предложена параметризация тензора напряжений с помощью 5 параметров: введенных ранее коэффициента формы эллипсоида напряжений $\varphi_\sigma = (\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)$ и соотношения между максимальным и минимальным главными напряжениями $N_\sigma = \sigma_1/\sigma_3$, а также трех углов Эйлера, определяющих направления действия главных напряжений. Коэффициент трения μ также относится к комбинации параметрам, реконструируемым в результате анализа естественной трещиноватости. В параграфе определены интервалы допустимых значений этих параметров, определяемые возможными ориентациями главных напряжений и условием неразрушения среды под действием тектонических сил на примере линейного критерия Кулона-Мора.

Далее описана аналогичная предыдущему параграфу процедура анализа чувствительности решения обратной задачи к исходным данным. Показано, что и в случае произвольно ориентированных главных осей тензора напряжений и совместной реконструкции напряжений и коэффициента трения, решение остается устойчивым по отношению к зашумлению данных о естественной трещиноватости.

Описанный алгоритм и результаты анализа чувствительности решения обратной задачи обсуждаются в **параграфе 6.4**, где сформулировано следующее защищаемое положение:

Защищаемое положение №5

Разработанный алгоритм реконструкции параметров напряженного состояния и коэффициента трения трещиноватых горных пород позволяет получать результаты, подтверждаемые независимыми оценками напряжений геофизическими методами, причем решение обратной задачи может быть сформулировано в терминах математической статистики с корректным учетом неоднозначности в оцениваемых параметрах.

Глава 6 была ограничена рассмотрением синтетических моделей трещин для анализа существования, единственности и устойчивости решения обратной задачи реконструкции напряжений и коэффициента трения по данным о флюидопроводимости естественных трещин. В **главе 7** представлены примеры успешного применения

разработанного алгоритма для оценки напряженного состояния горных пород по реальным геофизическим данным.

В **параграфе 7.1** представлен краткий обзор трех описываемых далее примеров применения разработанного метода реконструкции напряженного состояния и коэффициента трения пород околоскважинной зоны по данным о естественной трещиноватости, полученным с помощью геофизических исследований скважин из трех регионов: исследовательские скважины в регионе желоба Нанкай (Япония), скважины на геотермальном поле Ротокава (Новая Зеландия) и скважины, разрабатывающие месторождение углеводородов в республике Татарстан.

Параграф 7.2 посвящен реконструкции напряженного состояния по данным, полученным с исследовательской скважины в зоне субдукции – регионе потенциально сейсмоактивного желоба Нанкай. Дана информация об объекте исследования, подчеркивается наличие значительного объема данных о флюидопроводимости естественных трещин. Детально описана процедура решения обратной задачи реконструкции профилей напряжений: определены управляющие параметры (предположение о субвертикальности одной из главных осей тензора напряжений не используется ни в одном из параграфов данной главы) и диапазоны их изменения.

В параграфе представлен важный методологический аспект процедуры реконструкции: для детального исследования решения обратной задачи вместо ее единственного решения используется множество решений, полученных в ходе моделирования методом Монте-Карло, для которых целевая функция превышает некоторое заданное пороговое значение. Важность использования этого параметра продемонстрирована на Рисунке 6, на котором на стереограмме изображены возможные направления действия максимального σ_1 (красные точки), промежуточного σ_2 (оранжевые точки) и минимального σ_3 (зеленые точки) главных напряжений для совокупности реализаций, для которых целевая функция R превышает пороговое значение R_{crit} , указанное в подписи к каждому рисунку. Можно на качественном уровне оценить область эквивалентности решений обратной задачи: при недостаточно высоких величинах порогового значения направление σ_3 определяется с высокой точностью, для всех реализаций наблюдается высокая кучность этого направления. Два других напряжения при низких значениях R_{crit} оказываются почти равномерно распределены в плоскости, ортогональной направлению действия минимального главного напряжения. Эта неопределенность снижается при повышении порогового значения целевой функции, что свидетельствует о необходимости его корректного определения.

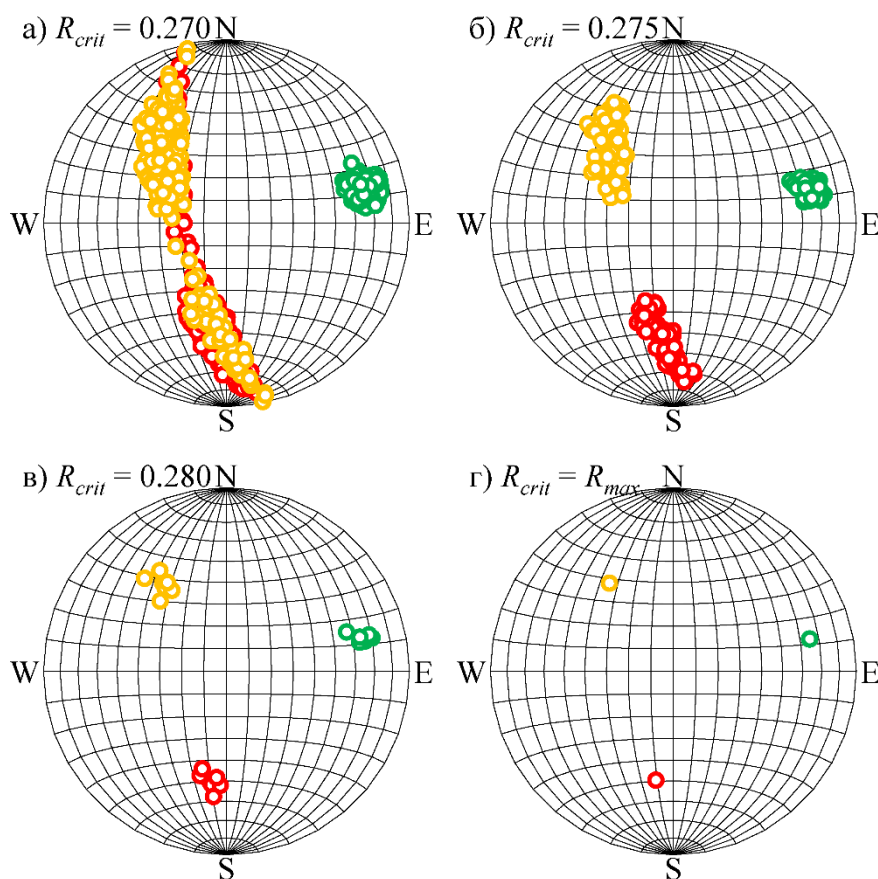


Рисунок 6 – Направления главных напряжений, реконструированные по трещинам со скважины в регионе желоба Нанкай для разных пороговых значений целевой функции

После выбора уровня порогового значения все реализации интерпретируются в терминах частотных распределений. Для данного случая дополнительно проведен факторный анализ, показавший, что не все параметры, определяющие напряженное состояние, могут быть реконструированы независимо. Показана существенная корреляция между коэффициентом трения и отношением максимального главного напряжения к минимальному. Несколько ниже корреляция между углами Эйлера, выражающаяся в области эквивалентных решений для направлений действия главных напряжений, продемонстрированной на Рисунке 6.

Выбранный объект исследования характеризуется не только значительным объемом информации о естественных трещинах, но и опубликованными в литературе независимыми оценками напряженного состояния. Для анализа различными авторами использовалась информация о вывалообразовании, результаты испытаний на приемистость и лабораторных исследований керна. В параграфе проведено детальное сравнение результатов различных реконструкций, обобщенное на Рисунке 7, где по вертикальной оси отложены результаты реконструкции напряжений по данным о трещиноватости на разных глубинах, а по горизонтали – оценки по вывалам.

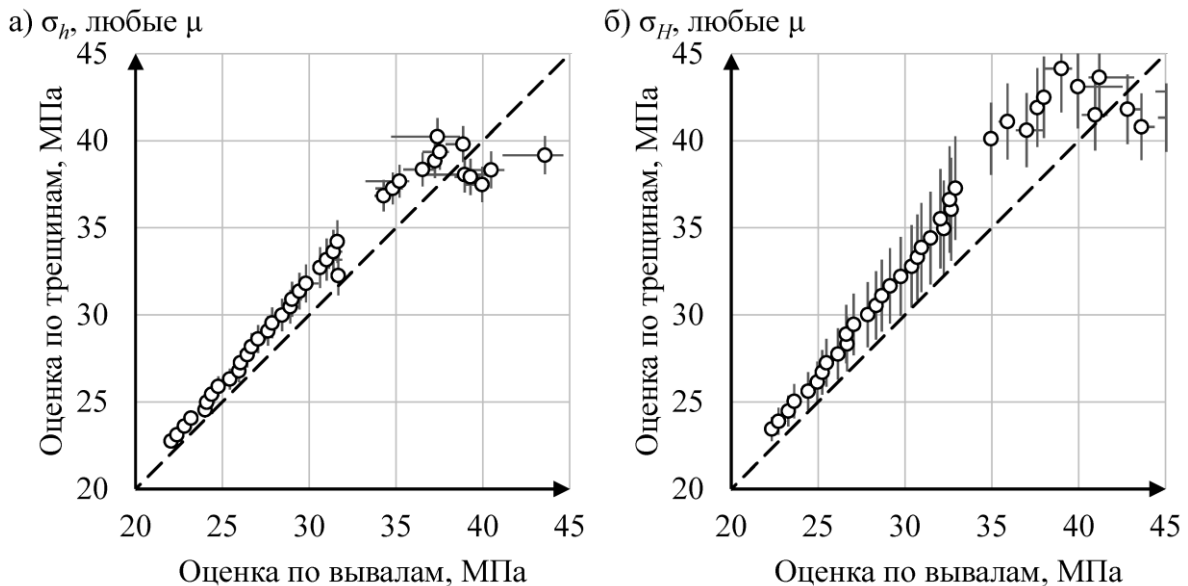


Рисунок 7 – Сравнение оценок минимального (а) и максимального (б) горизонтальных напряжений по данным о вывалообразовании и о естественной трещиноватости

Результаты этого сравнения позволяют говорить о согласии между различными оценками на количественном уровне и верифицировать результаты применения разработанного подхода к оценке напряжений по данным о естественных трещинах.

В **параграфе 7.3** аналогичная реконструкция была проведена с использованием данных, полученных со скважин геотермального поля Ротокава (Новая Зеландия). Эти скважины характеризуются огромным количеством естественных трещин, детальными исследованиями их флюидопроводимости и подтвержденной связью между проводящими и критически напряженными трещинами. В работе представлены результаты реконструкции, аналогичные показанным на Рисунке 6, наблюдается схожая проблема с реконструкцией только одной из главных осей тензора напряжений. Остается открытым вопрос корректного введения порогового значения целевой функции R_{crit} .

В параграфе продемонстрировано, что наличие больших объемов данных позволяет использовать статистические методы и для анализа решений обратной задачи. На Рисунке 8 показаны частотные распределения девяти параметров, наглядно определяющих напряженное состояние массива. В верхней строке показаны распределения абсолютных значений максимального, промежуточного и минимального главных напряжений. Переход от относительных параметров φ_σ и N_σ к абсолютным значениям выполнен через заданные глубины и известные значения вертикального напряжения. Во второй строке в том же порядке показаны углы между направлениями главных напряжений и вертикалью, в третьей – углы между проекциями направлений

действия трех главных напряжений на горизонтальную плоскость и направлением на север. Можно оценить реальные неопределенности в реконструкции и величин главных напряжений, и направлений их действия, а также степень нарушения гипотезы о субвертикальности одной из главных осей (реальное субвертикальное главное напряжение характеризуется углом отклонения от вертикали от 15 до 30°).

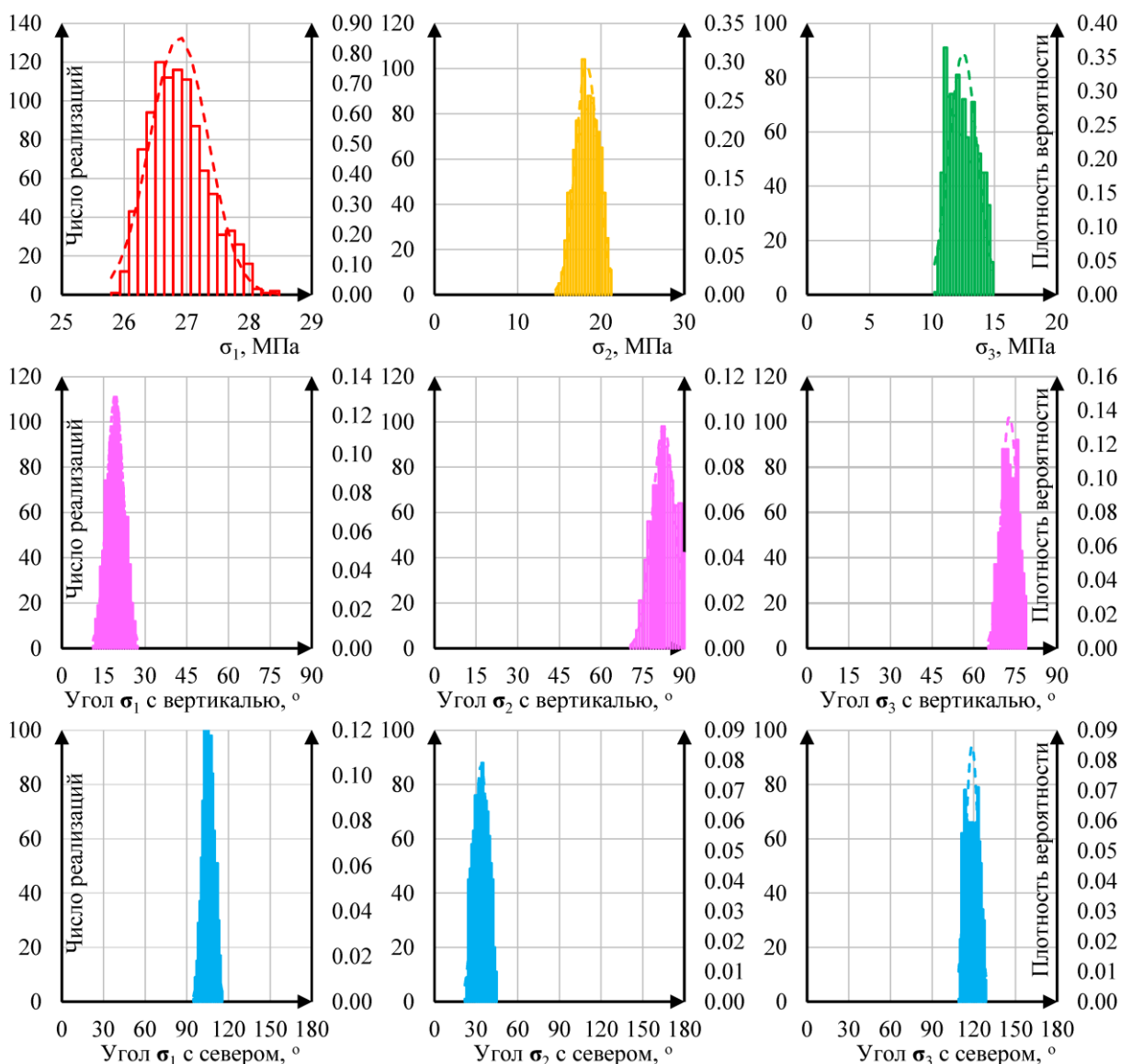


Рисунок 8 – Вероятностные оценки значений и направлений действия главных напряжений

Третий пример применения разработанного подхода к реконструкции напряженного состояния по данным о естественной трещиноватости описан в параграфе 7.4, где объектом исследования является нефтегазовое месторождение республики Татарстан.

В отличие от предыдущих двух примеров, в данном случае сведений о трещинах достаточно мало, что приводит к необходимости детального рассмотрения вопросов достаточности исходных данных для успешной реконструкции. Этот анализ позволил

предложить два возможных критерия корректного определения порогового значения целевой функции для последующего анализа решений обратной задачи.

В отличие от предыдущих двух случаев, ограниченный объем данных о естественной трещиноватости привел к необходимости использования распределений из семейства распределений Пирсона для теоретического описания множества решений обратной задачи (в предыдущих случаях можно было использовать нормальные распределения для всех параметров – пример показан пунктирной линией на Рисунке 8). В данном же случае явно проявлялись асимметрия и эксцесс распределений решений обратной задачи. На Рисунке 9 для величины минимального главного напряжения показаны частотные гистограммы и соответствующие им функции плотности вероятности, параметры которых определены методом моментов, для четырех показанных в легенде пороговых значений R_{crit} . Белой точкой отмечена мода распределения, а серой – величина минимального главного напряжения, определенная по давлению закрытия трещины гидроразрыва.

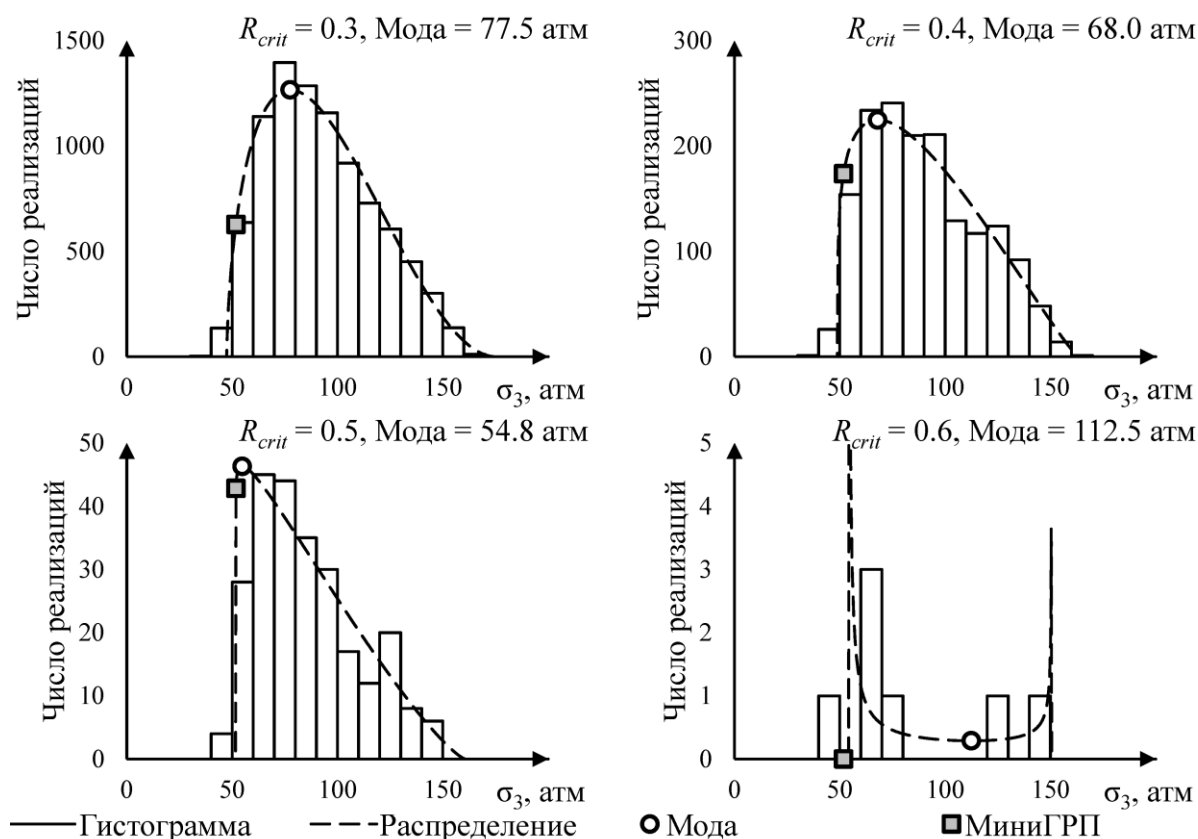


Рисунок 9 – Вероятностные оценки значений и направлений действия главных напряжений

Видно, что рост R_{crit} приводит сначала к снижению разницы между модовым значением распределения и его независимой оценкой, а затем к резкому увеличению этой разницы. На основании этого анализа предложен следующий способ определения

порогового значения для анализа: необходимо выбирать такой пороговый уровень целевой функции, при котором минимальна разница между наиболее вероятным решением обратной задачи и независимой оценкой. Также следует учитывать поведение дисперсии, которая имеет тенденцию к резкому росту при завышенных значениях R_{crit} . Дополнительная информация может быть получена в ходе рассмотрения последующих моментов распределения: в работе представлен анализ поведения эксцесса и асимметрии при изменении порогового значения целевой функции.

Результаты реконструкций напряжений по данным о естественной трещиноватости обобщены в **параграфе 7.5**, в котором подчеркивается, что разработанный алгоритм действительно позволяет использовать геофизические индикаторы проводимости естественных трещин сдвига для оценки относительных значений главных напряжений, направлений их действия, а также коэффициента трения среды, содержащей трещины. При этом результаты реконструкции находятся в количественном соответствии с независимыми оценками. Отмечаются вопросы, требующие дальнейшего исследования, а именно, корректный выбор порогового значения целевой функции для статистического анализа результатов решения обратной задачи и возможность выбора различных целевых функций. Подчеркивается преимущество функций, основанных на бинарных классификаторах в случаях недостаточных объемов исходных данных о трещиноватости, и функций, основанных на степени выраженности флюидопроводимости и Кулоновских напряжениях, если информация о трещиноватости представлена в больших объемах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен комплекс алгоритмов и подходов к постановке и решению прямых задач геомеханического описания естественной трещиноватости, к которым относится прогноз положений, пространственных ориентаций и флюидопроводимости естественных трещин сдвига по данным о напряженном состоянии геологической среды и его эволюции, а также обратных задач совместной реконструкции параметров, определяющих напряженное состояние массива горных пород, и отдельных реологических свойств по данным о флюидопроводимости и пространственных ориентациях естественных трещин. В обоих случаях существенное внимание уделялось вопросам статистического анализа результатов, что позволило корректным образом учесть все неоднозначности в исходных данных, используемых для анализа, а также эквивалентность различных решений при рассмотрении обратных задач. Разработанные алгоритмы и подходы могут быть напрямую использованы для повышения безопасности и эффективности освоения и разработки месторождений углеводородов, сложенных породами-коллекторами с низкими матричными фильтрационно-емкостными свойствами и развитой естественной трещиноватостью, а также для изучения механических процессов, протекающих в верхних слоях Земной коры.

Представленные в работе результаты не претендуют на полную завершенность и могут быть использованы в качестве базы для развития комплексов и методов исследования естественной трещиноватости геофизическими методами.

Представляется крайне перспективным использование статистического подхода для определения вида распределения трещин по положениям и пространственным ориентациям по фактическим данным. Построение и обоснование достоверности конкретных статистических законов может быть успешно использовано для создания синтетических моделей естественных трещин и их распространения в зоны межскважинного пространства. Комплексирование с методами геостатистики и петроупругого моделирования позволит учесть геологические особенности рассматриваемых массивов горных пород и оценить тренды возможных изменений пространственных ориентаций всех представленных трещин и тех из них, которые можно отнести к флюидопроводящим.

Использование вероятностного анализа в совокупности с гидродинамическими исследованиями может привести к возможности прогноза флюидопроводимости не как индикатора (проводящая/непроводящая трещина), а как конкретного числа –

гидродинамической проницаемости конкретной трещины или системы трещин. При этом необходимо учитывать, что проницаемость трещин является значительно более сложным фактором по сравнению с бинарным индикатором флюидопроводимости, что может потребовать значительно большего объема используемой геофизической информации для получения конкретных численных оценок. Перспективным представляется использование специальных гидродинамических исследований скважин, в частности, индикаторных исследований. С другой стороны, построение перехода от вероятностных моделей флюидопроводимости естественных трещин к дискретным моделям трещиноватости, используемым при гидродинамическом моделировании, позволит использовать алгоритмы адаптации гидродинамических моделей, хорошо развитые в области разработки месторождений углеводородов, для снятия дополнительных неопределенностей, упомянутых выше.

Отдельно можно отметить вопросы модификации критерия сухого трения для идентификации флюидопроводящих трещин по данным геомеханического моделирования.

При рассмотрении обратных задач также представляются интересными вопросы анализа факторов, влияющих на единственность и устойчивость решения. В рамках представленных результатов исследовалось преимущественно влияние напряженного состояния, однако аналогичным образом можно исследовать роль особенностей распределения трещин по пространственным ориентациям.

Далее можно остановиться на методах решения обратной задачи самих по себе. Представленные результаты носят в большей степени академический и исследовательский характер, однако внедрение разработанных подходов в практику требует существенного повышения быстродействия разработанных алгоритмов. Таким образом, к перспективам дальнейшего исследования можно отнести повышение скорости решения обратной задачи и создание программного модуля, интегрируемого с существующим программным обеспечением для геомеханического моделирования. В качестве инструментов, которые могут быть для этого использованы, можно выделить как классические методы решения обратных задач, так и методы, основанные на применении искусственного интеллекта.

Несмотря на наличие направлений дальнейших исследований, разработанный комплекс подходов и методов геомеханического описания трещиноватости уже внедряется в практику освоения и разработки месторождений углеводородов, позволяя повысить эффективность и безопасность этих процессов.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Антонов А.М., Вершинин А.В., **Дубиня Н.В.**, Краснова М.А. О связи локализации пластической деформации в горных породах с изменениями динамических упругих свойств: численное моделирование // Сейсмические приборы. 2024. Т. 60, № 4. С.5–18.
2. Баяк И.О., **Дубиня Н.В.**, Тихоцкий С.А. Проблемы петроупругого моделирования трещиноватых коллекторов // ПроНефть. 2019. № 3. С. 11–17.
3. Гарагаш И.А., **Дубиня Н.В.**, Русина О.А., Тихоцкий С.А., Фокин И.В. Определение прочностных свойств горных пород по данным трехосных испытаний // Геофизические исследования. 2018. Т. 19. № 3. С. 57–72.
4. **Дубиня Н.В.** Изучение поведения критически напряженных трещин на разных глубинах // Геофизические исследования. 2019(а). Т. 20. № 4. С. 5–24.
5. **Дубиня Н.В.** Закономерности в пространственной ориентации и положении флюидопроводящих естественных трещин в окрестностях крупных разломов // Ргонефть. 2019(б). № 3. С. 18–24.
6. **Дубиня Н.В.** Обзор скважинных методов изучения напряженного состояния верхних слоев Земной коры // Физика Земли. 2019(в). № 2. С. 137–155.
7. **Дубиня Н.В.**, Белобородов Д.Е., Краснова М.А., Леонова А.М., Тихоцкий С.А. Предварительные исследования возможности предсказания изменений внутренней структуры горных пород, вызванных псевдотрехосным сжатием, на основании зависимости деформаций от напряжений // Процессы в геосредах. 2022. № 4(34). С. 1809–1821.
8. **Дубиня Н.В.**, Галыбин А.Н. О распределении напряжений в слоистом массиве горных пород // Физика Земли. 2018. № 6. С. 106–116.
9. **Дубиня Н.В.**, Ежов К.А. Уточнение профилей горизонтальных напряжений в окрестности скважин по геометрическим характеристикам трещин в породах околоскважинного пространства // Геофизические исследования. 2017. Т. 18. № 2. С. 5–26.
10. **Дубиня Н.В.**, Зиганшин Э.Р., Новикова Е.В. Статистический анализ результатов реконструкции напряженного состояния по данным о проводимости естественных трещин // Процессы в геосредах. 2025. № 3(41). С. 2629–2640.
11. **Дубиня Н.В.**, Краснова М.А., Белобородов Д.Е., Леонова А.М., Тихоцкая О.А. Изучение изменения внутреннего строения при квазипластическом деформировании горных пород в лабораторных условиях // Сейсмические приборы. 2023. Т. 59. № 3. С.32–57.
12. **Дубиня Н.В.**, Тихоцкий С.А. О методе решения обратной задачи восстановления напряженно-деформированного состояния массива горных пород по данным о естественной трещиноватости // Физика Земли. 2022. № 4. С. 113–134.

13. **Дубиня Н.В.**, Тихоцкий С.А., Фокин И.В. Особенности определения прочностных свойств анизотропных горных пород при решении задачи оценки устойчивости ствола скважины и рекомендуемой плотности бурового раствора // Бурение и нефть. 2020. № 11. С. 36–41.
14. **Дубиня Н.В.**, Фокин И.В., Русина О.А. О связи модуля объемного сжатия трещиноватой среды с текущим напряженно-деформированным состоянием // Геофизика. 2018. № 3. С. 28–32.
15. Зиганшин Э.Р., **Дубиня Н.В.**, Васильев И.А., Маликов А.Д., Новикова Е.В., Сергеев А.С. Реконструкция пластовых напряжений в массивах горных пород на нефтяном месторождении Республики Татарстан в рамках слоистой модели // Сейсмические приборы. 2025(а). Т. 61, № 3. С.58–76.
16. Зиганшин Э.Р., **Дубиня Н.В.**, Кольчугин А.Н., Маликов А.Д., Сергеев А.С., Новикова Е.В., Васильев И.А. Обобщенная геомеханическая характеристика карбонатных пород нефтяного месторождения (Республика Татарстан) // Геофизика. 2025(б). № 4. С. 78–87.
17. Зиганшин Э.Р., **Дубиня Н.В.**, Новикова Е.В., Воронов И.А. Оценка современного напряженно-деформированного состояния массива карбонатных горных пород на нефтяном месторождении // Russian Journal of Earth Sciences. 2024. Т. 24. ES5006.
18. Новикова Е.В., **Дубиня Н.В.** Об устойчивости решения обратной задачи реконструкции напряженного состояния геологической среды на основании анализа естественной трещиноватости // Процессы в геосредах. 2023. № 4(38). С. 2240–2251.
19. Новикова Е.В., **Дубиня Н.В.**, Зиганшин Э.Р. Влияние неопределенностей моделей механических свойств на точность реконструкции параметров напряженного состояния // Процессы в геосредах. 2025. № 3(45). С. 3023–3031.
20. Chen Z.-L., Shi H.-Z., Xiong C., He W.-H., Wang H.-Z., Wang B., **Dubinya N.**, Ge K.-Q. Effects of mineralogical composition on uniaxial compressive strengths of sedimentary rocks // Petroleum Science. 2023. I. 20. P. 3062-3073.
21. **Dubinya N.V.** Spatial orientations of hydraulically conductive shear natural fractures for an arbitrary stress state: An analytical study of governing geomechanical factors // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2022(a). I. 212. P. 110288.
22. **Dubinya N.**, Bayuk I., Bakhmach M. Problems of Multiscale Brittleness Estimation for Hydrocarbon Reservoir Exploration and Development // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. P. 1134.
23. **Dubinya N.**, Galybin A. Reconstruction of stress trajectory field in Nankai subduction zone based on drilling data // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2025. V. 17. I. 2. P. 747-756.

24. Trimonova M., Stefanov Y., **Dubinya N.**, Bakeev R. A comprehensive study of the mechanical properties of rock-like materials for inelastic deformation model establishment // *Journal of Geomechanics*. 2025. Vol. 31. No. 3. P. 475–490.
25. Yang R., Wen H., Huang Z., Zhang B., Wang H., Wang B., **Dubinya N.** Experimental investigation on fracture characteristics by liquid nitrogen compound fracturing in coal // *Fuel*. 2023. I. 340. P. 127434.

Публикации в прочих изданиях:

1. **Дубиня Н.** О закономерностях в положениях и пространственных ориентациях флюидопроводящих трещин в окрестностях крупных разломов // Доклад, представленный на Российской нефтегазовой технической конференции SPE, Москва, РФ, 22-24 октября, 2019. 2019(г). SPE-196900-RU.
2. **Дубиня Н.В.**, Тихоцкий С.А., Фомичев С.В., Головин С.В. Использование геомеханически согласованной модели трещиноватости для оптимизации траектории наклонно-направленного бурения // Доклад, представленный на Российской нефтегазовой технической конференции SPE, Москва, РФ, 12-15 октября 2021. 2021. SPE-206559-RU.
3. Bayuk I.O., **Dubinya N.V.**, Garagash I.A., Tikhotskiy S.A., Tikhotskaya O.A. Multiscale Rock-Physics Modeling of Effective Elastic Properties of Fractured Reservoir Rocks // Paper presented at the 53rd US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium held in New York, NY, USA, 23–26 June 2019. 2019. ARMA 19–415.
4. **Dubinya N.V.** An analytical solution for spatial orientations of critically stressed fracture problem and its application for transitional stress regimes // Paper presented at the 54th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium held in Golden, Colorado, USA, 28 June-1 July 2020. 2020. ARMA 20–1184.
5. **Dubinya N.V.** Fluid Conductivity of Natural Shear Fractures in Vicinity of a Production Well During Directional Unloading // In: Chaplina, T. (eds) *Processes in GeoMedia—Volume IV*. Springer Geology. Springer, Cham. 2022. 2022(6). P. 239–251.
6. **Dubinya N.V.** Fluid Conductivity of Natural Shear Fractures in Vicinity of an Inclined Well // Paper presented at the 55th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium held in Houston, Texas, USA, 20-23 June 2021. 2021. ARMA 21–1148.
7. **Dubinya N.V.** Stress state estimation based on local variations of effective elastic moduli caused by presence of critically stressed fractures // Paper presented at the 53rd US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium held in New York, NY, USA, 23–26 June 2019. 2019(a). ARMA 19-139.
8. **Dubinya N.** Tendencies in hydraulically conductive fractures' patterns in vicinity of major faults // Paper presented at the SEG International Exposition and 89th Annual Meeting, San-Antonio, Texas, USA, 15-20 September 2019. 2019(6). P. 3658–3662.
9. **Dubinya N.**, Bayuk I., Tikhotskiy S., Rusina O. Localization and Characterization of Hydraulically Conductive Fractured Zones at Seismic Scale with the Help of Geomecha //

Paper presented at the 80th EAGE Conference & Exhibition 2018 held in Copenhagen, Denmark, 11–14 June 2018. 2018. Tu C 08.

10. **Dubinya N.V.**, Fokin I.V. Nonlinear model for reversible deformation of rock containing critically stressed fractures // Paper presented at the 52nd US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium held in Seattle, Washington, USA, 17–20 June 2018. 2018. ARMA 18–106.

11. **Dubinya N.V.**, Tikhotskiy S.A. Choice of correlation function for problem of stress estimation based on critically stressed fractures approach // Paper presented at the 54th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium held in Golden, Colorado, USA, 28 June-1 July 2020. 2020. ARMA 20–1506.

12. **Dubinya N.**, Tikhotsky S., Bayuk I., Beloborodov D., Krasnova M., Makarova A., Rusina O., Fokin I. Prediction of Physical-Mechanical Properties and In-Situ Stress State of Hydrocarbon Reservoirs from Experimental Data and Theoretical Modeling // Paper presented at the SPE Russian Petroleum Technology Conference held in Moscow, Russia, 16-18 October 2017. 2017. SPE-187823-MS.

13. Ezhov K., Arsibekov A., **Dubinya N.** Application of Special Well Logging Techniques for Geomechanical Model Improvement in Naturally Fractured Reservoirs // Paper presented at the SPE Russian Petroleum Technology Conference held in Moscow, Russia, 16-18 October 2017. 2017. SPE-187821-MS.

14. Ezhov K., Kolomytsev A., Petrova D., **Dubinya N.** An Energy-Based Brittleness Index Introduction and Application for Unconventional Shale Reservoir: A Case Study // Paper presented at the 82nd EAGE Conference & Exhibition 2020 held in Amsterdam, Netherlands, 8–11 December 2020. 2020. Fr_E106_15.

Подписано в печать **??.??**.2026 г.

Формат 64×84/16. Объем 2,0 усл. печ. л.

Тираж 100 шт. Заказ № **????**

Отпечатано в ИАЦ ИФЗ РАН

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

Тел./факс: (499) 254 90 88. E-mail: serg@tigra-press.ru