

На правах рукописи



Дубиня Никита Владиславович

**РЕКОНСТРУКЦИЯ ПРОФИЛЕЙ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ
НАПРЯЖЕНИЙ НА ОСНОВАНИИ СКВАЖИННЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ ТРЕЩИНОВАТОСТИ**

Специальность 25.00.10 Геофизика, геофизические
методы поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2018

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 руководитель: **Лукин Сергей Владимирович**,
кандидат физико-математических наук,
Общество с ограниченной ответственностью
«Газпромнефть – Научно-Технический Центр»,
руководитель направления

Официальные оппоненты: **Стефанов Юрий Павлович**,
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им.
А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской
академии наук, ведущий научный сотрудник
лаборатории глубинных геофизических исследований и
региональной сейсмичности

Остапчук Алексей Андреевич
кандидат физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Институт динамики геосфер Российской академии
наук, старший научный сотрудник лаборатории
деформационных процессов в земной коре

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования «Российский
государственный университет нефти и газа имени
И.М. Губкина»**

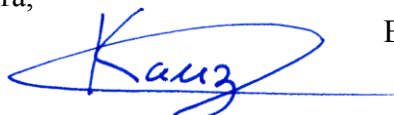
Защита состоится 13 декабря 2018 г. в 11⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 002.001.01 при ИФЗ РАН по адресу: 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1, конференц-зал.

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 Владимиру Анатольевичу Камзолкину.

Автореферат разослан «__» октября 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат геолого-минералогических наук



В.А. Камзолкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Исследования напряженного состояния верхних слоев земной коры имеют ярко выраженную теоретическую и практическую значимость, позволяя судить о тектонических процессах, происходящих в земной коре, и решать ряд практически ценных задач. В значительной степени, понимание основных закономерностей формирования и эволюции напряженного состояния верхних слоев земной коры необходимо для решения задач геомеханики месторождений углеводородов, возникающих на различных стадиях освоения и разработки месторождений. В свою очередь, при разработке нефтяных и нефтегазовых месторождений проводится целый комплекс исследований, позволяющих судить о параметрах, характеризующих напряженное состояние пород, слагающих месторождение. Корректная интерпретация таких исследований позволяет делать заключения о направлениях действия и величинах главных компонент тензора современных тектонических напряжений. Тем не менее, скважинные исследования дают лишь косвенную информацию о большинстве параметров напряженно-деформированного состояния, причем лишь в некоторых интервалах глубин. Полученные в ходе работы результаты позволяют расширить потенциал использования результатов выполняемых на скважинах геофизических исследований для оценки значений главных тектонических напряжений, действующих на сравнительно небольших глубинах, что может дать возможность глубже понять тектонические процессы, проявления которых могут наблюдаться в верхних слоях земной коры.

Цель работы

Использование расширенного комплекса геофизических исследований скважин, позволяющего анализировать естественную трещиноватость в породах, окружающих скважину, для оценки значений главных компонент тензора современных тектонических напряжений

Основные задачи исследования

1. Анализ современных подходов к реконструкции профилей главных напряжений по скважинным данным, определение пределов их применимости и неоднозначностей, возникающих при их применении.

2. Создание подхода к реконструкции профилей главных напряжений на основании скважинных исследований трещиноватости, его верификация и проверка устойчивости получаемых результатов.
3. Применение разработанного подхода для выполнения реконструкции главных напряжений по скважинным исследованиям на нефтяных месторождениях и в регионах проведения бурения.

Научная новизна работы заключается в создании нового подхода к интерпретации результатов расширенного комплекса геофизических исследований скважин, позволяющего судить о современном напряженном состоянии пород вблизи скважин с проведенным комплексом исследований. Этот подход может стать важным дополнением к существующему комплексу методов реконструкции профилей главных напряжений, снижая степень неопределенности, возникающей при решении обратной задачи оценки текущего напряженного состояния пород по комплексу геофизических данных.

Основные научные положения, выносимые на защиту

1. Задача реконструкции профилей главных напряжений вдоль скважин по данным существующих прямых методов измерения параметров напряжённо-деформированного состояния является некорректной и имеет класс эквивалентных решений, определяемый линейной комбинацией двух независимых параметров.
2. Анализ критически напряжённых естественных трещин, выявленных на стенках скважины по данным расширенного комплекса ГИС, позволяет снизить неопределённость в определении профилей главных напряжений.
3. Применение полигона напряжений и комплекса методов определения напряженного состояния по скважинным данным, включая: анализ вывалообразования, изучение естественной трещиноватости, гидроразрыв пласта (тест на приемистость) – позволяет с высокой точностью определять возможные значения максимального горизонтального напряжения.

Теоретическая и практическая значимость работы

Разработанный автором подход к использованию расширенного комплекса геофизических исследований скважин позволил выполнить ряд построений геомеханических моделей распределения значений главных современных напряжений вдоль траекторий скважин. Такие модели были построены для скважин нескольких месторождений России и одного месторождения Сербии. Выполненные построения

позволили решить некоторые практически важные задачи геомеханики месторождений, такие как прогноз зон трещиноватости, достижение безаварийного бурения и прогноз эволюции фильтрационно-емкостных свойств по мере разработки месторождения. Также был произведен ряд построений, имеющих фундаментальную значимость: выполненные реконструкции профилей главных напряжений вдоль скважин исследовательского проекта Nankai Trough Seismogenic Zone Experiment по изучению напряженного состояния региона желоба Нанкай (южное побережье острова Хонсю, Япония) позволили судить о пространственных распределениях главных напряжений на больших глубинах в области зоны субдукции.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 144 страницы, 52 рисунка, 1 таблицу и список литературы из 106 наименований.

Личный вклад

Основные результаты работы, полученные лично соискателем в ходе проведения исследования, включают: выполнение обзора литературы анализ существующих подходов к реконструкции главных напряжений по скважинным данным, поиск класса эквивалентности решений обратной задачи; математическую формулировку обратной задачи определения горизонтальных напряжений на основании анализа трещиноватости; создание синтетической модели и верификацию на ней сформулированного подхода к реконструкции напряжений; выполнение построений ряда моделей механических свойств и реконструкцию профилей напряжений на скважинах нефтяных месторождений России; формулировку модификаций к разработанному подходу на случаи отсутствия некоторых входных данных; оценку возможных напряжений на скважине месторождения Сербии; построение одномерных геомеханических моделей на скважинах региона желоба Нанкай.

Апробация работы

По теме работы автором опубликовано 29 печатных работ, из которых 3 статьи в журналах, включенных в перечень российских рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертации, и 8 расширенных тезисов, цитируемых в системе SCOPUS. Результаты работы докладывались на 13 российских и 3 международных профильных научных конференциях, включающих: Третий всероссийский семинар-совещание «Триггерные эффекты в геосистемах» (Москва, 2015), IV Балтийская школа-семинар

«Петрофизическое моделирование осадочных пород» (Петергоф, 2015), четвертая и пятая молодежные тектонофизические школы-семинары (Москва, 2015 и 2017), 54 – 58-е научные конференции МФТИ, (Долгопрудный, 2011-2015), XXI Губкинские чтения (Москва, 2016), Научные конференции молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН (Москва, 2016 и 2017), конференция SPE Петрофизика XXI века (Санкт-Петербург, 2016), Четвертая тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН (Москва, 2016), 5-я научно-практическая конференция EAGE "Тюмень 2017" (Тюмень, 2017), Международная геолого-геофизическая конференция и выставка: «Современные технологии изучения и освоения недр Евразии» GeoEurasia 2018, Российские нефтегазовые технические конференции SPE (Москва, 2015 и 2017), ежегодная конференция Американского Союза Геофизиков AGU Meeting (San-Francisco, 2016), и ежегодные конференции японского общества геофизиков JpGU Meeting (Makuhari, 2016, 2017, 2018), 52nd US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium (Сиэтл, 2018).

Благодарности

Автор выражает благодарность своему научному руководителю к.ф.-м.н. С.В. Лукину за плотное сотрудничество и поддержку на всех этапах выполнения работы, своему соавтору К.А. Ежову за постоянные консультации в области петрофизики и участие в создании разработанного подхода; сотрудникам Института Физики Земли, в особенности, д.ф.-м.н. И.О. Баюк, д.ф.-м.н. А.Н. Галыбину, к.ф.-м.н. М.А. Красновой, д.ф.-м.н. Ш.А. Мухамедиеву, д.ф.-м.н. Ю.Л. Ребецкому и д.ф.-м.н. С.А. Тихоцкому за многочисленные консультации на разных этапах выполнения работы и ценные советы; сотрудникам ООО «Газпромнефть-НТЦ» за помощь в определении актуальных задач разработки месторождений углеводородов. Отдельная благодарность сотрудникам Института Динамика Геосфер и Московского Физико-Технического Института за полученное образование в области геомеханики месторождений. Автор также благодарит членов японского союза геофизиков, д-ра Т. Ito, д-ра Н.-Yu Wu и д-ра Е.-Ch. Yeh за проявленный к работе интерес и рекомендации по модификации разработанного подхода и областях его применимости. Особую благодарность автор выражает В.А. Дубине, М.Г. Дубиня и Т.И. Герасимовой за личную поддержку.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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.

Первая глава посвящена обзору современных методов использования скважинных исследований для определения геомеханических параметров, характеризующих напряженно-деформированное состояние пород в окрестности скважин.

В разделе 1.1 рассматриваются некоторые задачи геомеханики месторождений углеводородов, возникающие на практике: поиск оптимальной плотности бурового раствора для достижения безаварийного бурения скважин, прогноз геометрии трещин ГРП и автоГРП, предсказание траектории трещины повторного ГРП, эволюция фильтрационно-емкостных свойств пород, слагающих коллектор, в ходе разработки месторождения. Рассмотрены некоторые работы по обозначенным проблемам, в том числе, и работы соискателя. Показано, что для решения многих задач геомеханики месторождений углеводородов критически важным является знание значений горизонтально направленных современных тектонических напряжений или, по крайней мере, соотношений между ними.

Раздел 1.2 посвящен обзору методов получения информации о тектонических напряжениях. Кратко рассмотрены основные тектонофизические подходы, позволяющие оценивать направления и значения главных напряжений, действующих в области месторождения углеводородов. Представлена основная гипотеза, отделяющая проблемы геомеханики месторождений углеводородов от более общих проблем геомеханики – гипотеза о субвертикальной направленности одной из главных осей тензора тектонических напряжений, обоснованная сравнительно небольшими глубинами рассматриваемых объектов по сравнению с характерными масштабами изменения траектории главных напряжений. Выделено важное понятие тектонического режима – сбросового, сдвигового или надвигового, – характеризующее соотношение значений вертикального и горизонтальных напряжений, считающихся, в рамках принятой гипотезы, главными. Показано, что принятие указанной гипотезы позволяет снизить количество переменных, характеризующих напряженное состояние, с шести (три главных напряжения и три угла Эйлера, характеризующие направления главных

осей тензора напряжений) до четырех. При этом из трех углов Эйлера остается только один, который является азимутом максимального горизонтального напряжения.

В разделе описаны прямые методы определения значения минимального горизонтального напряжения по точечным измерениям – тестам на приемистость и миниГРП (мини-гидроразрыв пласта). Показано, что характерное поведение параметров, фиксируемых при проведении этих тестов, а именно кривой забойного давления, позволяет с некоторой точностью определить значение минимального горизонтального напряжения по давлению закрытия трещины.

Также в разделе описаны принципы реконструкции профилей главных напряжений – пространственных распределений их значений вдоль траектории скважины. Отмечена необходимость характеризовать напряженное состояние, используя термины эффективных напряжений в рамках теории пороупругости Био, что приводит к появлению еще одного неизвестного параметра – давления насыщающего породу флюида. Описаны способы реконструкции профилей вертикального напряжения и порового давления по данным геофизических исследований скважин.

Выводом по разделу является выявленная неопределенность трех параметров, характеризующих горизонтальные напряжения. Эти параметры – минимальное горизонтальное напряжение σ_h , максимальное горизонтальное напряжение σ_H и азимут максимального горизонтального напряжения θ .

Раздел 1.3 полностью посвящен проблеме реконструкции указанных трех параметров по данным геофизических исследований скважин. Показано, что геофизические исследования позволяют судить о значениях горизонтальных напряжений лишь в определенных пределах.

Подробно рассмотрен способ определения значений горизонтальных напряжений по анализу проявлений при бурении – вывалов и трещин растяжения. Показано, что концентрация напряжений в окрестности скважины в начальном приближении может быть описана с помощью полученного решения модификации задачи Кирша. Показано, каким образом азимут максимального горизонтального напряжения и значения горизонтальных напряжений могут быть получены из интерпретации геометрических характеристик вывала при известных прочностных свойствах среды.

Несмотря на то, что анализ вывалов является наиболее широко применимым на практике подходом к реконструкции значений горизонтальных напряжений, он имеет свои недостатки, указанные в разделе, а именно: высокую чувствительность

оцениваемых параметров по отношению к ошибкам, допущенным при интерпретации, и близкую к нулевой эффективность в интервалах безаварийного бурения. Рассмотрены подходы по экстраполяции реконструируемых значений на весь интервал глубин, определены их недостатки, характеризующиеся либо слишком сильным упрощением (линейная аппроксимация), либо введением значительного количества дополнительных неизвестных (экстраполяция в рамках пороупругой модели).

В разделе 1.4 рассмотрена задача реконструкции профилей горизонтальных напряжений по конечному набору точечных измерений минимального горизонтального напряжения по результатам тестов на приемистость и миниГРП в рамках пороупругой модели и в рамках линейной аппроксимации. Показано, что при применении пороупругой модели указанные входные данные позволяют выполнить реконструкцию профилей горизонтальных напряжений лишь с точностью до класса функций, удовлетворяющих условию:

$$\varepsilon_h + \nu(z_i)\varepsilon_H = (1 + \nu(z_i)) \frac{\sigma_h(z_i) \cdot (1 - \nu(z_i)) - \sigma_v(z_i)}{E(z_i)}, \quad (1)$$

где ε_h и ε_H являются, соответственно, минимальной и максимальной горизонтальными деформациями, принимаемыми в данной модели в качестве параметров, определяющих значения горизонтальных напряжений, $\sigma_h(z_i)$ – набор измеренных точечных значений минимального горизонтального напряжения на глубинах замеров z_i , $\sigma_v(z_i)$ – вертикальные эффективные напряжения на соответствующих глубинах, $\nu(z_i)$ и $E(z_i)$ – соответственно, коэффициент Пуассона и модуль Юнга на тех же глубинах. Соотношение (1) является, вообще говоря, системой из нескольких уравнений, число которых совпадает с числом проведенных точечных измерений. Однако, как показано в разделе, корректное проведение этих измерений приводит к тому, что все эти уравнения являются линейно зависимыми. Таким образом, количество параметров, характеризующих значения горизонтальных напряжений (их два – горизонтальные деформации ε_h и ε_H) превышает число независимых уравнений на единицу.

Аналогичный результат получен и для случая линейной аппроксимации, для которого область эквивалентных решений определена с точностью до отношения минимального горизонтального напряжения к вертикальному. При этом о максимальном горизонтальном напряжении ничего сказать нельзя. В обоих рассмотренных моделях число неизвестных на единицу превышает число независимых уравнений, определяемых точечными измерениями.

В целом, вывод о необходимости наложения дополнительной связи на значения горизонтальных напряжений является **основным выводом по главе 1**. Отмечено, что выявленная неопределенность может быть устранена привлечением косвенных измерений, в первую очередь, анализа вывалов. Однако существует необходимость снижать неопределенность реконструируемых по этому подходу значений, а также искать пути решения проблемы в случае отсутствия вывалов.

Во **второй главе** представлены основы подхода, разработанного соискателем, направленного на сужение области возможных значений горизонтальных напряжений. Подход заключается в том, что на значения горизонтальных напряжений налагается дополнительная связь, получаемая при анализе естественной трещиноватости, которая наблюдается в породах, окружающих скважину. При этом используется расширенный комплекс геофизических исследований скважин.

В **разделе 2.1** приведен анализ экспериментальных и полевых работ, на основании которого строится предлагаемый подход. Авторы описанных исследований указывают на существование связи между естественными трещинами, находящимися в современном поле напряжений в критическом напряженном состоянии, и трещинами, обладающими хорошими флюидопроводящими свойствами. Показано, что трещину можно считать флюидопроводящей, если напряжения, действующие на ее поверхности, удовлетворяют критерию сухого трения:

$$\tau_n \geq \mu \sigma_n, \quad (2)$$

где τ_n и σ_n – значения касательного и нормального напряжений, действующих на плоскости трещины, μ – коэффициент трения породы, в которой находится трещина.

Также рассмотрены некоторые работы, в которых гипотеза связи флюидопроводящих и критически напряженных трещин оспаривается. Как правило, в этих работах идет речь либо о трещинах растяжения, либо о трещинах большего масштаба, чем рассматриваемые в работе трещины в породах околоскважинного пространства.

В **разделе 2.2** сформулирована обратная задача реконструкции значений горизонтальных напряжений по анализу трещиноватости. При формулировке обратной задачи использованы результаты, описанные в предыдущем разделе. Показано, что наличие связи между критически напряженными и флюидопроводящими трещинами позволяет наложить на горизонтальные напряжения дополнительную связь, которая рассматривалась в главе 1. Наложение такой связи становится возможным в том случае,

если трещины околоскважинного пространства можно разделить на флюидопроводящие и нефлюидопроводящие по независимому комплексу геофизических исследований, также описанному в этом разделе. Показана возможность проведения множественных расчетов, в ходе которых для любой пары параметров, характеризующих горизонтальные напряжения, могут быть рассчитаны нормальное и касательное напряжения на всех трещинах, наблюдаемых в породах околоскважинного пространства. В результате этого каждая трещина может быть отнесена к классу критически напряженных или ненапряженных в соответствии с критерием (2). Таким образом, могут быть выбраны такие значения параметров, характеризующих значения горизонтальных напряжений, при которых наблюдается наилучшее соответствие между критически напряженными и флюидопроводящими трещинами. В общем виде, полученное условие записано как:

$$N = N(\varepsilon_h, \varepsilon_H) = N(\sigma_h/\sigma_v, \sigma_H/\sigma_v) = N^*, \quad (3)$$

где N – число трещин, отнесенных к классу критически напряженных при выбранной паре управляющих параметров (горизонтальных деформаций ε_h и ε_H для упругой модели или отношений горизонтальных напряжений к вертикальному σ_h/σ_v и σ_H/σ_v для модели линейной аппроксимации), N^* – число трещин, отнесенных к классу флюидопроводящих по независимому комплексу геофизических исследований.

В заключении раздела отмечено, что построенный подход позволяет наложить на значения горизонтальных напряжений дополнительную связь, добавляя к выражению типа (1) независимое от него нелинейное уравнение (3), содержащее те же неизвестные. Показано, что эти уравнения позволяют определить возможные значения параметров, управляющих профилями горизонтальных напряжений. При этом отмечено, что рассматриваемая система уравнений не обязательно должна иметь единственное решение; в общем случае можно говорить о счетности множества решений этой системы. Таким образом, предложенный подход позволяет реконструировать профили горизонтальных напряжений по точечным прямым измерениям минимального горизонтального напряжения и по результатам анализа трещиноватости с точностью до счетного количества решений.

Пример применения подхода и его верификация рассмотрены в **разделе 2.3**. Синтезирована одномерная модель механических свойств и не противоречащие ей профили порового давления, вертикального и горизонтальных напряжений. Выбрана единственная точка прямого измерения минимального горизонтального напряжения,

имитирующая проведение миниГРП. Данные дополнены информацией о трещинах в породах околоскважинного пространства и информацией об их флюидопроводимости.

Подход применен для реконструкции профилей горизонтальных напряжений по данным о трещиноватости и результатам проведения миниГРП. Получено несколько решений, одно из которых соответствует исходным профилям горизонтальных напряжений. Область эквивалентных решений сужалась по мере уменьшения ошибки в интерпретации трещиноватости, рассмотренной как погрешность при определении флюидопроводящих трещин. В качестве параметра, характеризующего эту область, была выбрана введенная ширина коридора допустимых значений максимального горизонтального напряжения. Поведение этой величины как функции от ошибки в определении доли флюидопроводящих трещин, показанное на рис. 1, указывает на устойчивость решения рассмотренной обратной задачи к зашумлению входных данных.

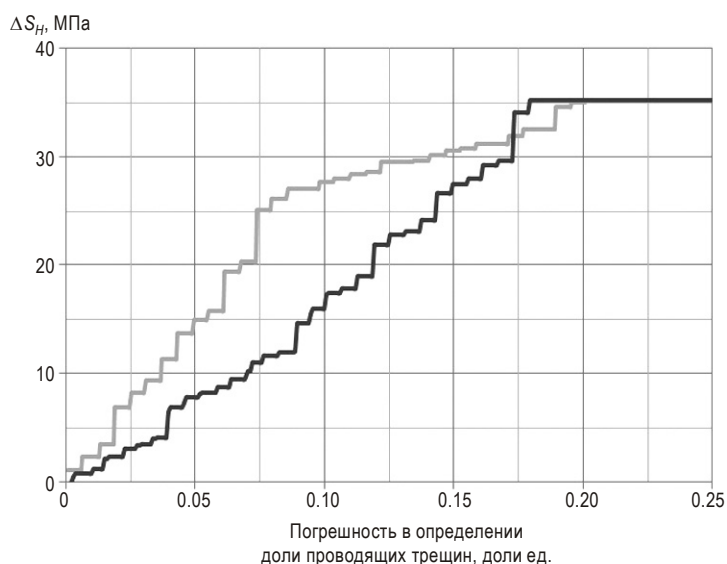


Рис. 1. Анализ эффективности предлагаемого подхода. Ширина коридора допустимых значений максимальных напряжений как функция погрешности в определении доли флюидопроводящих трещин при “истинной” доле проводящих трещин 0.25 (серая кривая) и 0.35 (черная)

Основным результатом по главе 2 является сформулированный, теоретически обоснованный и верифицированный на синтетических данных подход к использованию анализа трещиноватости для реконструкции профилей горизонтальных напряжений.

Глава 3 посвящена проблемам применения предложенного подхода к реконструкции профилей горизонтальных напряжений по данным скважинных исследований трещиноватости в случае отсутствия точечных измерений минимального горизонтального напряжения.

В разделе 3.1 рассмотрен полигон напряжений, характеризующий все возможные значения горизонтальных напряжений, при заданных прочностных свойствах породы и вертикальном напряжении на рассматриваемой глубине.

Рассмотрен случай, допускающий аналитическое решение задачи определения критически напряженных трещин: горизонтальные напряжения линейно возрастают с глубиной, коэффициент трения породы неизменен, ориентации трещин в породах околоскважинного пространства равномерно распределены по углам. Получено аналитическое решение в виде явной функции доли критически напряженных трещин от отношений горизонтальных напряжений к вертикальному: σ_h/σ_v и σ_H/σ_V .

Для случая, допускающего аналитическое решение, выполнена параметризация полигона напряжений – выделены области значений горизонтальных напряжений, в которых доля трещин, являющихся критически напряженными, составляет некоторые интервалы. Создан инструмент, позволяющий быстро определять возможные диапазоны значений горизонтальных напряжений для заданной доли критически напряженных трещин в отсутствие прямых измерений минимального горизонтального напряжения. Параметризация полигона напряжений для случая, допускающего аналитическое решение, приведена на рис. 2.

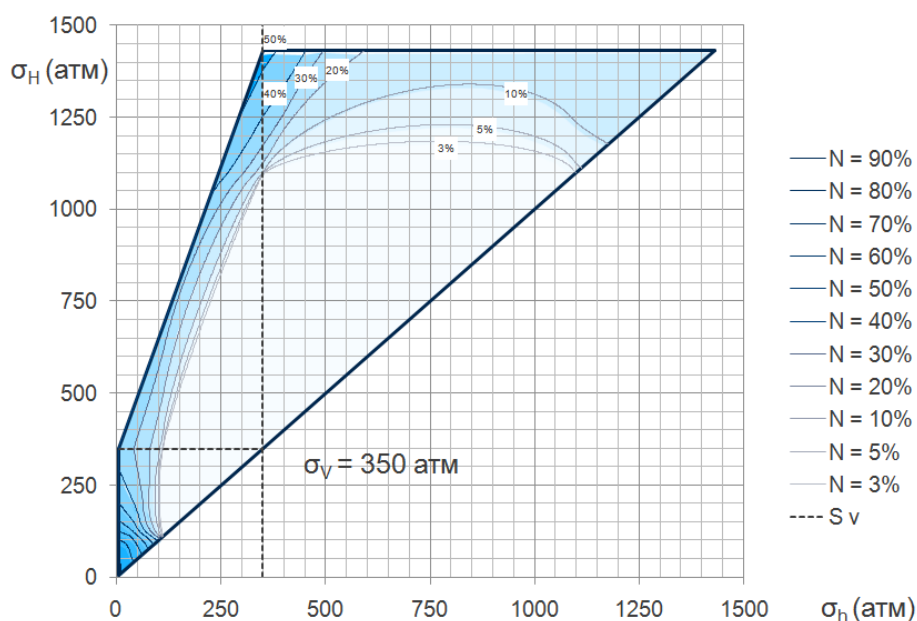


Рис. 2. Параметризация полигона напряжений. Сплошные черные линии ограничивают область значений горизонтальных напряжений на заданной глубине, удовлетворяющих условию неразрушения среды за счет тектонических сил. Пунктирные линии разграничивают тектонические режимы. Сплошные линии соответствуют комбинациям горизонтальных напряжений, допускающим заданную долю трещин N , являющихся критически напряженными. Цветами закрашены области, в которых доля трещин N ограничена значениями, указанными в легенде

В разделе 3.2 приведен пример использования разработанного подхода для реконструкции профилей горизонтальных напряжений для скважин одного нефтяного месторождения России. В отсутствие тестов на приемистость и миниГРП полученные результаты характеризовались достаточно высокой степенью неопределенности. Тем не менее, в интервалах наличия вывалов независимая проверка показала качественное соответствие вывалов, смоделированных на основании реконструированных профилей, реальным; в некоторых интервалах можно говорить и о количественном соответствии.

Раздел 3.3 посвящен применению разработанного подхода для реконструкции профилей напряжений для скважины нефтяного месторождения Сербии. Выполнен описанный анализ трещиноватости, построен полигон напряжений. Продемонстрировано, каким образом данные одного прямого измерения минимального горизонтального напряжения на глубине, принадлежащей рассмотренному интервалу, позволило существенно снизить неопределенность в реконструируемом профиле максимального горизонтального напряжения (рис. 3).

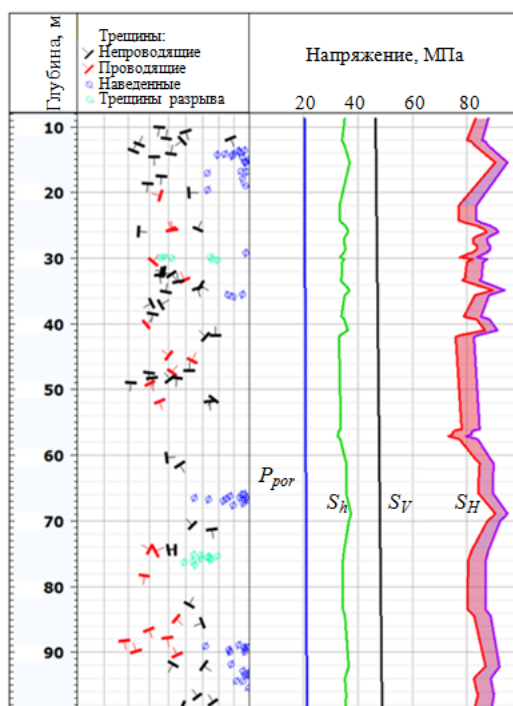


Рис. 3. Планшет исследованной скважины. Слева направо: глубина, классификация трещин и их углы падения (красным выделены критически напряженные трещины); поровое давление (синяя кривая), минимальное горизонтальное напряжение (зеленая кривая), вертикальное напряжение (черная кривая), нижняя и верхняя границы максимального горизонтального напряжения (красная и сиреневая кривая соответственно)

Степень неоднозначности полученных результатов довольно невелика – ширина коридора возможных значений максимального горизонтального напряжения составила всего 5.8 МПа (рис. 3).

В отсутствие прочих способов верификации полученного результата можно говорить о его качественном подтверждении, поскольку прочие исследования региона указывают на существование ярко выраженного сдвигового режима, также полученного и при реконструкции горизонтальных напряжений.

Основным результатом по главе 3 является сформулированный автором подход использования полигона напряжений для оценки горизонтальных напряжений по анализу трещиноватости и его успешное использование на различных объектах. При этом результаты реконструкции подтверждаются независимыми исследованиями.

В **главе 4** представлены результаты последней модификации разработанного автором подхода к реконструкции профилей горизонтальных напряжений по данным скважинных исследований трещиноватости для случая ограниченного количества геофизических исследований скважин.

В **разделе 4.1** отмечены основные недостатки созданного подхода – высокая требовательность к количеству входных данных скважинных исследований и неоднозначность связи между критически напряженными и флюидопроводящими трещинами. Показано, что для полноценного применения подхода необходимо использовать расширенный комплекс геофизических исследований, в первую очередь необходимо наличие данных скважинных микросканеров двух типов – электрического и ультразвукового. Однако использование обоих микросканеров при работе на одной и той же скважине встречается редко, так как сопряжено с большими финансовыми затратами.

Подход к решению этих проблем показан в **разделе 4.2**: с использованием теории эффективных сред продемонстрировано, что можно установить связь между критически напряженными трещинами и областями с высоким значением параметра связности включений. Такой подход позволяет, с одной стороны, использовать меньшее количество входных данных, поскольку параметр связности можно оценить и по стандартному комплексу геофизических исследований, – а с другой стороны, приводит к более корректной гипотезе, лежащей в основе разработанного подхода к реконструкции напряжений.

В **разделе 4.3** показано применение разработанной модификации подхода для реконструкции профилей горизонтальных напряжений на примере исследовательской

скважины, расположенной в тектонически активном регионе желоба Нанкай, Япония. Проведена интерпретация имеющегося комплекса геофизических исследований и выполнено построение полигонов напряжений для различных интервалов глубин.

Для наиболее исследованной верхней части интервала выполнено сравнение построенных полигонов с результатами реконструкции других исследователей (рис. 4). Наличие теста миниГРП на этом интервале и значительное количество вывалов позволило достаточно точно определить значения горизонтальных напряжений и верифицировать полученные результаты. Показано, что точность реконструкции напряжений по анализу трещиноватости близка к точности подхода по анализу вывалов.

В то же время, более глубокие интервалы рассматриваемой скважины представляют трудность для построения геомеханической модели, так как в этих интервалах вывалы обнаружены не были. Анализ трещиноватости позволил построить соответствующие полигоны напряжений на этих интервалах, обеспечив тем самым важные результаты по оценке современного поля напряжений региона. Была подтверждена гипотеза переиндексации горизонтальных напряжений на большой глубине, ранее высказанная исследователями региона.

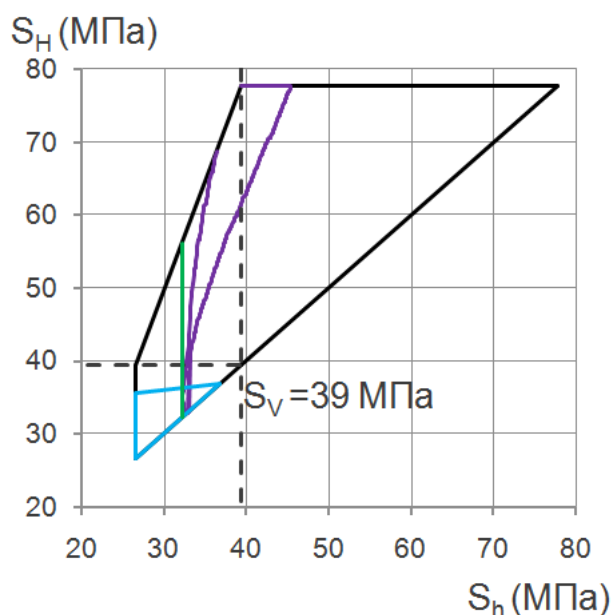


Рис. 4. Полигон напряжений для исследовательской скважины региона желоба Нанкай. Черная сплошная линия – границы полигона напряжений, фиолетовая линия – границы области допустимых напряжений из анализа трещиноватости, голубая линия – границы области допустимых напряжений из анализа вывалов, зеленая линия – измерение миниГРП. Пересечение зеленой линии с областью допустимых значений напряжений по любому подходу задает интервал возможных значений максимального горизонтального напряжения

Полученный результат демонстрирует, в том числе, и некоторое преимущество разработанного подхода над анализом вывалов – возможность реконструкции профилей напряжений в интервалах безаварийного бурения. Эта возможность была реализована для исследовательской скважины С0002, пробуренной в регионе желоба Нанкай и являющейся основным источником информации о тектонике этого региона. Подход к реконструкции напряжений по данным скважинных исследований трещиноватости позволил оценить возможные значения максимального горизонтального напряжения, действующего в окрестности скважины в зоне влияния разлома. Важно отметить, что на больших глубинах на этой скважине вывалы не наблюдались, в связи с чем, стандартный подход к оценке напряжений был неприменим. Результаты реконструкции напряжений по данным скважинных исследований трещиноватости продемонстрированы на рис.5.

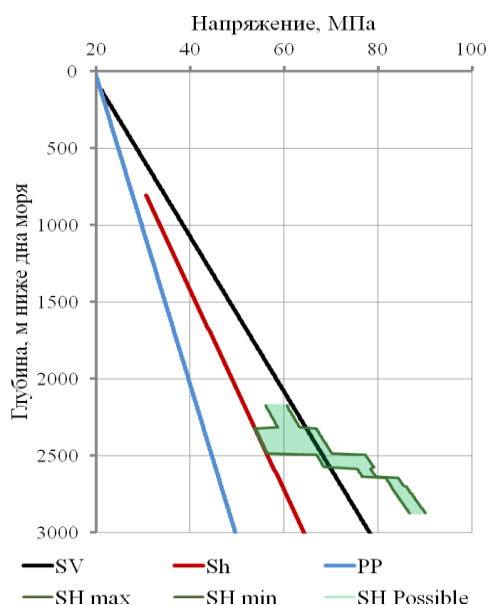


Рис. 5. Реконструкция напряжений для исследовательской скважины региона желоба Нанкай. Синяя линия – поровое давление, черная – вертикальное напряжение, красная – минимальное горизонтальное напряжение, зеленый интервал – возможные значения максимального горизонтального напряжения

Результаты реконструкции совпадают с качественным представлением о тектонике региона, сформировавшимся у специалистов, занимающихся исследованием напряженного состояния желоба Нанкай, и будут использоваться при планировании дальнейших операций по исследовательскому бурению региона.

Основным результатом по главе 4 и по всей работе является сформулированный и верифицированный подход к использованию комплекса геофизических исследований скважин для выполнения анализа трещиноватости и

последующей оценки возможных значений горизонтальных напряжений. Разработанный подход характеризуется широкой областью применимости по сравнению со стандартными подходами к реконструкции профилей горизонтальных напряжений и может дополнять их для уменьшения неопределенности в реконструированных значениях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведённых исследований были получены новые результаты в области методов изучения напряжённо-деформированного состояния горных пород в естественном залегании по скважинным данным, имеющие непосредственное значение для решения актуальных задач геомеханического моделирования при проведении как фундаментальных, так и прикладных исследований.

В частности, в явном виде найден класс эквивалентности решений обратной задачи определения напряжений по возможным прямым измерениям в скважинах в рамках существующих моделей. Этот результат свидетельствует об актуальности работы и обосновывает защищаемое положение 1.

Разработан подход к решению задачи реконструкции горизонтальных напряжений по скважинным данным, основывающийся на концепции критически напряженных трещин. Сформулирован основной алгоритм применения этого подхода и проведена его верификация на синтетических данных. Показано, что скважинные исследования трещиноватости действительно позволяют снизить неопределенность, возникающую при реконструкции напряжений. Верификация подхода на синтетических данных, а также результаты сравнения реконструированных профилей с независимыми исследованиями, представленные в главах 3 и 4, обосновывают защищаемое положение 2.

Использование полигона напряжений для более качественного применения разработанного подхода, описанное в главе 3, позволило существенно расширить область его применимости на случаи отсутствия данных прямых оценок горизонтальных напряжений и данных о тектонике региона. Представлены результаты оценок значений горизонтальных напряжений, выполненных на основании анализа трещиноватости для скважин, разрабатывающих два нефтяных месторождения, и представлена их верификация, обосновывающая защищаемое положение 3.

Предложена модификация подхода к реконструкции напряжений на основании скважинных исследований трещиноватости с привлечением результатов теории эффективных сред и экспериментальных исследований, позволяющая реконструировать профили горизонтальных напряжений по данным скважинных исследований трещиноватости и стандартному набору данных геофизических исследований скважин. Применение этой модификации для скважины региона желоба Нанкай позволило сравнить эффективность разработанного подхода с существующими методами реконструкции профилей напряжений. Получено, что результаты

реконструкций горизонтальных напряжений, выполненных стандартными методами и на основании скважинных исследований трещиноватости, согласованы друг с другом.

Выполнена реконструкция напряжений по скважинным исследованиям трещиноватости для интервалов безаварийного бурения исследовательских скважин региона желоба Нанкай, показывающая изменение тектонического режима со сбросового на сдвиговый на глубинах более 4 км от уровня моря, что согласуется с качественными представлениями о тектонике региона. Успешное применение разработанного подхода к реконструкции напряжений на основании скважинных исследований трещиноватости в регионе желоба Нанкай и сравнение полученных результатов с другими оценками напряженного состояния в регионе обосновывает защищаемое положение 4.

Таким образом, в результате работы разработан новый метод решения задачи реконструкции параметров напряженного состояния по данным скважинных исследований, основывающийся на анализе трещиноватости пород околоскважинной зоны. Этот подход позволяет повысить достоверность определения горизонтальных напряжений с помощью скважинных исследований, имеет важное значение для решения практических задач геомеханики в нефтегазовой отрасли, а также для решения фундаментальной задачи анализа тектонических процессов, протекающих в верхних слоях земной коры.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в периодических изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Дубиня Н.В., Галыбин А.Н. О распределении напряжений в слоистом массиве горных пород // Физика Земли. – 2018. – № 6. – С. 1–11.
2. Дубиня Н.В., Ежов К.А. Уточнение профилей горизонтальных напряжений, действующих в окрестности скважин, по геометрическим характеристикам трещин в породах околоскважинного пространства // Геофизические исследования. – 2017. – Т. 18. – № 2. – С. 5–26.
3. 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.

Публикации в прочих изданиях:

1. Дубиня Н.В. Влияние массовых сил, возникающих в окрестности трещины ГРП, на локальное напряженно-деформированное состояние // Труды 56-й научной конференции МФТИ. Аэрофизика и космические исследования. – Москва, Долгопрудный, Жуковский: МФТИ., 2013. – Т.2. – С. 86–87.
2. Дубиня Н.В. Исследование особенностей развития трещины ГРП в неоднородной слоистой среде // Материалы XXI Губкинского чтений. – М.: РГУ им. И.М. Губкина, 2016. – Т. 5. – С. 38–41.
3. Дубиня Н.В. Прогнозирование направления развития трещины при повторном гидравлическом разрыве пласта // Труды 55-й научной конференции. Аэрофизика и космические исследования. – Москва, Долгопрудный, Жуковский: МФТИ., 2012. – Т. 2. – С. 84–86
4. Дубиня Н.В., Ежов К.А. Методика определения максимального горизонтального напряжения из анализа трещиноватости // Материалы четвертой молодежной тектонофизической школы-семинара. – М.: ИФЗ РАН, 2015. – С. 101–107.
5. Дубиня Н.В., Ежов К.А. Один метод определения локального поля напряжений из анализа трещиноватости // Триггерные эффекты в геосистемах (Москва, 16-19 июня 2015 г.): материалы третьего Всероссийского семинара-совещания / Под ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна. – М.: ГЕОС, 2015. – С. 98–106.
6. Дубиня Н.В., Ежов К.А. Возможность уточнения профилей горизонтальных напряжений вдоль траекторий скважин на основании анализа трещиноватости // Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН: Тезисы докладов и

программа Конференции. ИФЗ РАН, Москва, 25-26 апреля 2016 г. – М.:ИФЗ РАН, 2016 – С. 30.

7. Дубиня Н.В., Ежов К.А. Уточнение значений тектонических напряжений на основании внутрискважинных исследований трещиноватости. // Четвертая тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН. Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: материалы докладов всероссийской конференции - в 2-х томах. – М.: ИФЗ РАН, 2016. – Т. 2. – С. 260–267.

8. Дубиня Н.В., Лукин С.В., Чебышев И.С. Совмещенное трехмерное моделирование поведения нефтяного пласта с помощью метода конечных элементов // Триггерные эффекты в геосистемах (Москва, 16-19 июня 2015 г.): Тезисы докладов III Всероссийского семинара-совещания / Под ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна. – М.: ГЕОС, 2015. – С.27–28.

9. Ежов К.А., Дубиня Н.В. Методика количественной оценки максимального горизонтального напряжения на основе анализа трещиноватости // Материалы XXI Губкинских чтений. – М.: РГУ им. И.М. Губкина, 2016. – Т. 3. – С. 39–44.

10. Тримонова М.А., Дубиня Н.В. Основные закономерности развития трещин автоГРП // Триггерные эффекты в геосистемах (Москва, 16-19 июня 2015 г.): материалы третьего Всероссийского семинара-совещания / Под ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна. – М.: ГЕОС, 2015. – С.106–113.

11. Тримонова М.А., Дубиня Н.В., Зенченко Е.В., Зенченко П.Е., Турунтаев С.Б. Математическое и физическое моделирование процесса распространения трещины автоГРП // Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН: Тезисы докладов и программа Конференции. ИФЗ РАН, Москва, 25-26 апреля 2016 г. – М.: ИФЗ РАН, 2016 – С. 66.

12. Dubinya N. Horizontal stress profiles reconstruction based on elastic properties and natural fractures' characteristics. NanTroSEIZE case study // Japan Geosciences Union Meeting Proc., Makuhari, 2017. SIT24-P05.

13. Dubinya N., Ezhov K. A new approach to determining stress state in the crust on the basis of well data using borehole imagers // Japan Geosciences Union Meeting Proc., Makuhari, 2016. STT18-10.

14. Dubinya N.V., Ezhov K.A. Earth's crust using log data with unknown regional stress regime // Proceedings of “Tyumen 2017” held in Tyumen, Russia 27-31 March 2017. – 2017. – P. 64–68.

15. **Dubinya N.**, Ezhov K. The evaluation of maximum horizontal in-situ stress using the wellbore imagers data // AGU FALL MEETING, San Francisco, 2016.
16. **Dubinya N.**, Fokin I. Critically Stressed Fractures and Their Relation to Elastic Moduli // Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes. 3rd International Scientific School for Young Scientists, Ishlinskii Institute for Problems in Mechanics of Russian Academy of Science. 2018. P. 35–44.
17. **Dubinya N.**, Fokin I. Establishing relationship between effective elastic moduli and stress state using critically stressed fractures concept // Japan Geosciences Union Meeting Proceedings. 2018. SIT26-03.
18. **Dubinya N.**, Fokin I. Nonlinear model for reversible deformation of rock containing critically stressed fractures // ARMA 18-106. Proceedings of 52nd US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, 17-20 June 2018, Seattle, Washington. – 2018. – P. 1–9.
19. **Dubinya N.V.**, Lukin S.V., Chebyshev, I.S. Two-Way Coupled Geomechanical Analysis of Naturally Fractured Oil Reservoir's Behavior Using Finite Element Method // SPE-176631-MS. Proceedings of SPE Russian Petroleum Technology Conference, 26-28 October, 2015, Moscow – 2015. – P. 1–16.
20. **Dubinya N.**, Rusina O. Natural fractures and stress state analysis from Nankai Trough wells' logging data // Japan Geosciences Union Meeting Proceedings. 2018. SSS04-03.
21. **Dubinya N.V.**, Tikhotskiy S.A., Bayuk I.O., Beloborodov D.E., Krasnova M.A., Makarova A.A., Rusina O.A. Prediction of Physical-Mechanical Properties and In-Situ Stress State of Hydrocarbon Reservoirs from Experimental Data and Theoretical Modeling // SPE-187823-MS. Proceedings of SPE Russian Petroleum Technology Conference, 16-18 October, 2017, Moscow. – 2017. – P. 1–15.
22. Ezhov K.A., **Dubinya N.V.**, Arsibekov A.A. Application of special well logging techniques for geomechanical model improvement in naturally fractured reservoirs // SPE-187821-MS. Proceedings of SPE Russian Petroleum Technology Conference, 16-18 October, 2017, Moscow. – 2017. – P. 1–13.
23. Galybin A., **Dubinya N.** Elastic stress field reconstruction in the Nankai Trough area based on WSM and drilled data. Japan Geosciences Union Meeting Proc., Makuhari, 2017. SIT24-12.
24. Lukin S.V., Oshmarin R.A., Tugarova M.A., **Dubinya N.V.**, Chebyshev I.S. Modeling of Effective Pressure Effect on Deformation Mechanisms of Fractured Reservoirs // SPE-

176604-MS. Proceedings of SPE Russian Petroleum Technology Conference, 26-28 October, 2015, Moscow – 2015. – P. 1–15.

25. Trimonova M.A., **Dubinya N.V.** The Main Tendencies of Water-Induced Fracture Propagation // SPE-176631-MS. Proceedings of SPE Russian Petroleum Technology Conference, 26-28 October, 2015, Moscow – 2015. – P. 1–16.

26. Trimonova M.A., **Dubinya N.V.** The Method of Determination of Water-Induced Hydraulic Fracture's Geometry // IET Conference Publications. – 2015. – Vol. 674. – P. 142-147.

Подписано в печать . . .2018 г.

Формат 64×84/16. Объем 1,0 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